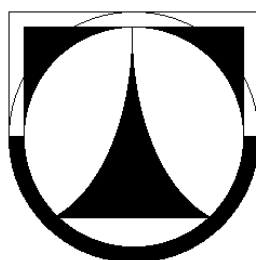
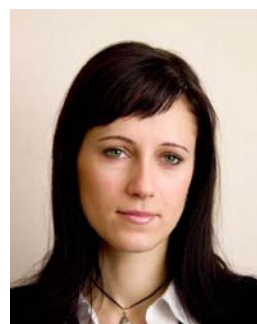


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE



LIBEREC 2009

JANA PEŇÁZOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství

Studijní obor: Textilní materiálové inženýrství

Katedra netkaných textilií

VÝROBA 3D NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV A STRUKTUR PRO MEDICÍNU

PRODUCTION OF 3D NANOFIBER LAYERS AND STRUCTURES FOR MEDICAL

Autor: Jana Peňázová

Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. David Lukáš, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Chvojka

Rozsah práce a příloh:

Počet stran textu: 87

Počet obrázků: 35

Počet tabulek: 9

Počet grafů: 1

Počet příloh: 3

V Liberci, 30. května 2009

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní
Katedra netkaných textilií
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana PEŇÁZOVÁ**
Studijní program: **N3106 – Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Textilní materiálové inženýrství**

Název tématu: Výroba 3D nanovlákných vrstev a struktur pro medicínu

Zásady pro vypracování :

1. Proved'te literární rešerši zadané problematiky.
2. Navrhněte zařízení pro elektrostatické zvlákňování objemných vrstev. Soustřed'te se především na konstrukci kolektoru.
3. Vyrobené vrstvy nanovlákných materiálů analyzujte pomocí optické i elektronové mikroskopie.
4. Vyhodno'te různé konstrukce kolektorů a jejich vliv na strukturu vlákně vrstvy a produktivitu technologie.

Rozsah grafických prací: **10**
Rozsah pracovní zprávy: **70**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W., Lim, T., Ma, Z.: An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, New Jersey, World Scientific, 2005, ISBN 981-256-454-3**
[2] **Reneker, D. H., Fong, H. : Polymeric Nanofibers, American Chemical Society, 2006, ISBN 084-123-919-3**
[3] **Lanza R. P., Langer R., Vacanti J.: Principles of Tissue Engineering, Second Edition, San Diego, Academic Press, 2000, ISBN: 0-12-436630-9**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. RNDr. David Lukáš, CSc.**
Katedra netkaných textilií

Zadání diplomové práce: **20. října 2008**
Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2009**

.....
Prof. Ing. Jiří Militký, CSc.
děkan

.....
Prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 10. listopadu 2008

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 30. 5. 2009

.....

Podpis

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci, květen 2009

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce Prof. RNDr. Davidu Lukášovi, CSc. a konzultantovi Ing. Jiřímu Chvojkovi za odborné vedení, cenné rady, podněty a připomínky, které mi poskytli při vypracování této diplomové práce.

Dále bych ráda poděkovala svým rodičům a příteli za veškerou podporu během celého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi výroby objemné nanovláknenné vrstvy pro tkáňové inženýrství. Součástí zadané úlohy je návrh kolektorů pro výrobu těchto nanovláknenných vrstev pomocí technologie elektrostatického zvlákňování.

První část práce obsahuje souhrn teoretických poznatků o výrobě nanovláken metodou elektrostatického zvlákňování, informace o použitých polymerech ke zvlákňování a přiblížení problematiky tkáňového inženýrství.

Experimentální část je věnována konstrukci zařízení na výrobu trojrozměrných vrstev z nanovláken, včetně popisu způsobu výroby těchto vrstev. V závěru práce jsou hodnoceny výsledky zvlákňování z několika hledisek - ochota zvlákňování, výkon zařízení, průměr nanovláken, vhodnost zhotovených nanovláknenných vrstev pro použití v biomedicině.

Klíčová slova: Nanovláknna, Elektrostatické zvlákňování, Kolektor, Tkáňové inženýrství, Scaffold, Biodegradabilita

Annotation

This diploma thesis deals with possibility to produce volume nanofibrous layers for tissue engineering. Part of the task is proposing of the collectors for producing fibrous layers by electrospinning.

The first part contains overview of theoretical findings about production of nanofibers made by electrospinning, information about used polymers and deals with the problem of tissue engineering.

Experimental part of this thesis puts mind to the construction equipment for the production of three-dimensional layers of nanofibres. Further the technologies of nanofiber layers production are characterized. On the end of this part attained results are evaluated with respect to - willingness to spinning, equipment performance, nanofibers diameter and suitability of produced nanofiber layers for biomedicine.

Keywords: Nanofibers, Electrospinning, Collector, Tissue Engineering, Scaffold, Biodegradable

Seznam použitých symbolů a zkratek

$(C_2H_5)_4NBr$	Tetraethylammonium bromide
$C_2H_2O_2$	glyoxal
DMF	N,N-dimethylformamide
H_3PO_4	kyselina trihydrogenfosforečná
$HCON(CH_3)_2$	N,N-dimethylformamide
$CH_3-CO-CH_3$	aceton (dimethylketon)
$NaCl$	Chlorid sodný
$PEOEMA$	Poly(2-ethoxyethylmetakrylát)
PUR	polyuretan
PVA	polyvinylalkohol
$TEAB$	Tetraethylammonium bromide
Δ^2	Laplaceův operátor
c	rychlost světla ve vakuu [$m \cdot s^{-1}$]
D	gradient rychlosti (rychlost deformace, rychlost smyku) [s^{-1}]
d	vzdálenost desek [m]
du	vzájemná rychlost pohybu smykových rovin [$m \cdot s^{-1}$]
dx	vzdálenost smykových rovin [m]
E	elektrické pole
F	síla [N]
k	elektrická konstanta úměrnosti [$N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$]
m	hmotnost [kg]
Mr	relativní molekulová hmotnost
n	kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$]
Q	elektrický náboj [C]
q	jednotkový náboj [C]
r	vzdálenost bodových nábojů [m]
S	plocha [m^2]
U	elektrostatické napětí
V	celková plocha pórů
W	práce [J]
Z	procentuální zaplnění [%]

ε_0	absolutní permitivita prostředí [$C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$]
η	dynamická viskozita [Pa.s]
η_s	zdánlivá viskozita [Pa.s]
σ	směrodatná odchylka
σ^2	rozptyl
τ	tečné napětí [Pa]
φ	elektrický potenciál [V]
\vec{E}	intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]

OBSAH

1 ÚVOD.....	14
1.1 Cíl práce	15
1.2 Rešerše.....	15
2 TEORETICKÁ ČÁST	19
2.1 Elektrostatické zvlákňování	19
2.1.1 Princip procesu elektrostatického zvlákňování	19
2.1.2 Typy elektrostatického zvlákňování	20
2.1.3 Parametry elektrostatického zvlákňování	23
2.1.4 Polymery používané pro elektrostatického zvlákňování	32
2.1.5 Nanovlákná	32
2.2 Elektrostatika.....	34
2.2.1 Elektrický náboj a Coulombův zákon	34
2.2.2 Vlastnosti a intenzita elektrického pole	35
2.2.3 Potenciál a napětí elektrického pole	37
2.2.3 Metody určování elektrostatického pole	38
2.2.3 Elektrostatické pole mřížky	39
2.3 Použité polymery	41
2.3.1 Polyvinylalkohol (PVA)	41
2.3.2 Polyuretany (PUR)	43
2.3.3 Poly(2-ethoxyethyl methakrylat) – (PEOEMA)	44
2.4 Tkáňové inženýrství	44
2.4.1 Základní pojmy tkáňového inženýrství	44
2.4.2 Princip tkáňového inženýrství	45
2.4.3 Scaffoldy pro tkáňové inženýrství	46
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
3.1 Cíl experimentu a jejich průběh.....	48
3.2 Použité polymerní roztoky	49
3.2.1 Roztok PVA.....	49
3.2.2 Roztok PUR.....	50
3.2.3 Roztok Poly(2-ethoxyethyl methakrylatu) – (PEOEMA).....	52
3.3 Popis použitých zařízení, laboratorních přístrojů a programů v experimentu	54
3.3.1 Zařízení pro elektrostatické zvlákňování	54
3.3.2 Horkovzdušná komora.....	55
3.3.3 Rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130.....	55
3.3.4 Obrazový analyzátor NIS Elements AR 3.0	56
3.4 Návrh kolektorů pro elektrostatické zvlákňování	56
3.4.1 Kolektor č. 1	57
3.4.2 Kolektor č. 2	58
3.4.3 Kolektor č. 3	59
3.4.4 Kolektor č. 4	59
3.5 Zvlákňování roztoků na navržené kolektory	60
3.5.1 Zvlákňování z 12% roztoku PVA	62
3.5.2 Zvlákňování z 15% roztoku PUR	67
3.5.3 Zvlákňování z 10% roztoku PEOEMA.....	69
3.6 Snímky nanovláknenných vrstev z rastrovacího mikroskopu VEGA TS 5130.....	73
3.6.1 Snímek nanovrstvy z 12% PVA	73
3.7 Kriteria pro vyhodnocení nanovláknenných vrstev	77
3.7.1 Průměry vláken.....	77

3.7.2 Nežádoucí strukturní útvary.....	78
3.7.3 Procento zaplnění	78
3.7.4 Produktivita zvláknovacího zařízení.....	78
4 DISKUZE A VÝSLEDKY	81
5 ZÁVĚR.....	83
Seznam použité literatury.....	85
Seznam obrázků	91
Seznam tabulek	94
Seznam grafů	94
SEZNAM PŘÍLOH.....	95

1 ÚVOD

Vývoj materiálů, které by lépe splňovaly požadavky spotřebitelů, náhrada obtížně dostupných surovin novými a hledání produktivnějších způsobů výroby budou určovat další směry rozvoje výroby a použití textilií. Snaha najít co nejproduktivnější způsob výroby textilií vedla k vývoji netkaných textilií, zvláště v oblasti výzkumu a aplikací tzv. nanomateriálů. V textilním průmyslu se jedná především o přípravu vláken miniaturních průměrů z polymerního roztoku nebo taveniny. Takto vyrobená vlákna se nazývají nanovláknena a bývají označována za materiály třetího tisíciletí. Vyznačují se výjimečnými vlastnostmi, zvláště vysokým měrným povrchem, což je poměr povrchu vláken k jejímu objemu, velkou pórovitostí vláknenné vrstvy s malým rozměrem pórů. Tyto vlastnosti jsou neobyčejné a přinášejí tak revoluci v medicíně, elektronice, automobilovém průmyslu, dále ve filtraci, v ochraně životního prostředí a v mnoha jiných odvětvích lidské činnosti.

Velmi pozoruhodnou oblastí je tkáňové inženýrství, kde se v současné době vědci zabývají vývojem trojrozměrných nosičů buněk. Tyto nosiče (scaffoldy) mají za úkol podpořit, zpevnit a v některých případech orientovat obnovující se tkáň. Mezi požadavky kladené na takové nosiče buněk patří například vhodná pórovitost s vzájemně propojenými póry a žádoucí chemické a mechanické vlastnosti. Textilní materiály jsou velmi všestranné, přizpůsobivé, různorodé a proto ideální jako scaffoldy pro tkáňové inženýrství. Scaffoldy mohou být pleteny, tkány, vyrobeny ze splétaných materiálů, vyrobeny pomocí vyšívání či dalších technik a kombinací předchozích. Jednou z metod jak vyrobit trojrozměrné nosiče buněk je elektrostatické zvláknění (electrospinning). Elektrostaticky zvlákněná struktura uvádí morfologickou obdobu extracelulární matrice přirozené tkáně, která je charakterizována širokým rozsahem distribuce průměru póru, vysokou pórovitostí a efektivních mechanických vlastností. Jemná struktura elektrostatických nanovláken je proto ideální pro tkáňové inženýrství. Konstrukce poskytuje biomechanický tvar pro nahrazení tkáně až do té doby, dokud buňky nevytvoří svojí vlastní extracelulární matici.

Elektrostatické zvlákňování je relativně jednoduchá metoda, při které dochází k samoorganizaci polymerního roztoku v elektrostatickém poli, tedy nastává zvlákňování roztoku. Takto vzniklá nanovláknenná struktura má jedinečné vlastnosti, např. velký měrný povrch a vysokou poróznost. Tyto vlastnosti jsou důležité pro správnou adhezi a růst buněk.

1.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout kolektory pro elektrostatické zvlákňování objemných vrstev. Vyrobené vrstvy nanovláknenných materiálů analyzovat pomocí elektronové mikroskopie a zjistit, jestli vyrobená trojrozměrná nanovláknenná struktura bude vhodná jako nosič buněk ve tkáňovém inženýrství.

1.2 Rešerše

Úkolem následujících odstavců je stručně shrnout poznatky několika významných publikací, které se zabývají výrobou elektrostaticky zvlákňovaných netkaných textilií a jejich využitím ve tkáňovém inženýrství.

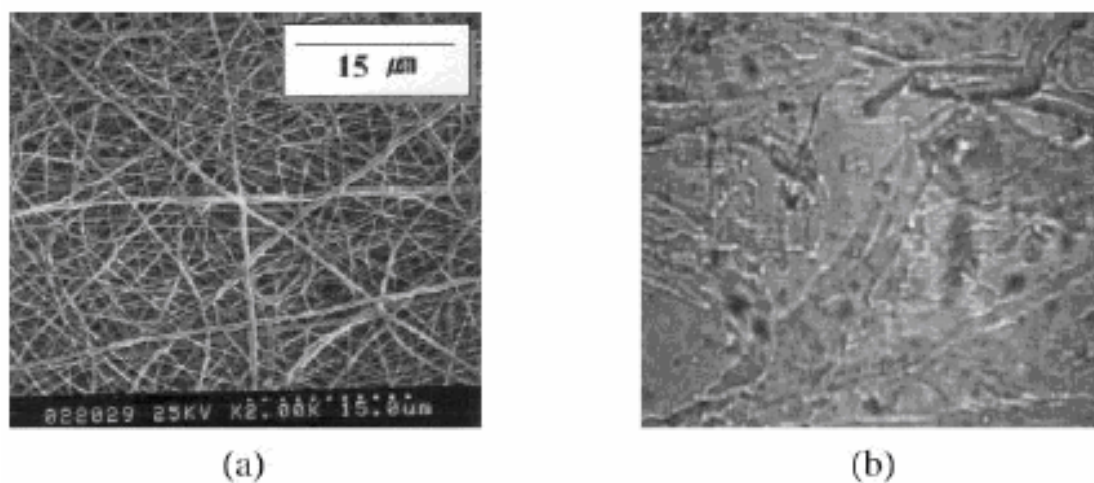
Třebaže je mnoho metod, jak vyrábět nanovláknna, je elektrostatické zvlákňování nejvšestrannější metodou. To co dělá elektrostatické zvlákňování odlišné od jiných procesů vyrábějících nanovláknna, je schopnost vytvářet různé uspořádání nanovláken ve vrstvě. Vrstva může mít nanovláknna orientovaná v jednom směru [12] nebo naopak orientovaná náhodně. To nepochybně zvýší produkci výrobků z nanovláken a umožní jejich modifikaci pro speciální aplikace. Proto je důležité porozumět různým materiálovým a procesním parametrům a postupům, které ovlivňují uspořádání vláken v nanovrstvě. Např. orientace nanovláken ve struktuře tkáňového nosiče ovlivňuje uspořádání buněk. Proto k vytvoření různých struktur, které vznikají při elektrostatickém zvlákňování, je nutná podrobnější studie zvlákňovacího procesu.

Pokud jde o flexibilitu procesu, je elektrostatickým zvlákňováním možné vyrobit kontinuální nanovláknna z velké škály materiálů, např. z polymerů, kompozitů, polovodičů a keramiky [1, 2, 12].

V posledním desetiletí bylo publikováno mnoho studií, které pojednávají o základech elektrostatického zvlákňování [3, 4], elektrostatických podmínkách při zvlákňování [1, 5, 6] nebo charakteristice vláken pro různé aplikace [7, 8, 9]. Velice dobré shrnutí různých studií o electrospinningu a nanovlákněch lze najít v knize *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers* [10].

Další významná práce [11] se zabývá studií tkáňového nosiče z nanovláken, která jsou vyrobena z poly(L-lactid-co-epsilon-caprolactone) [P (CL-LLA)] v poměru 75:25. U tohoto nosiče byla prokázána příznivá interakce s lidskou koronární tepnou. Specifické uspořádání a vzhled vyrobeného nosiče prokázalo vliv na buněčné množení a morfologii a může tedy představovat ideální tkáňový nosič, zejména pro cévní inženýrství.

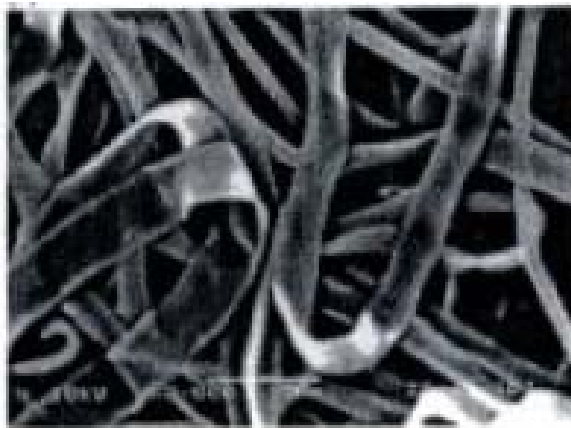
Jiným významným experimentem bylo vytvoření nanovláknenné polyuretanové polopropustné membrány k hojení ran. Tato struktura měla díky pórovitosti vynikající propustnost kyslíku a regulovaný odvod tekutiny z rány. Nebyla pozorována žádná migrace vnějších mikroorganismů do rány ani toxicita. Tkáňové zkoušky potvrdily zvýšenou epitelizaci a kratší čas na vyléčení rány. Na Obr. 1 je vidět rozdílná struktura polopropustné nanovláknenné membrány a náplasti TegadermTM, která je konvekčním přípravkem pro krytí zranění. [16]



Obr. 1 a) polopropustná nanovláknenná membrána z PU b) náplast Tegaderm (200x) [16]

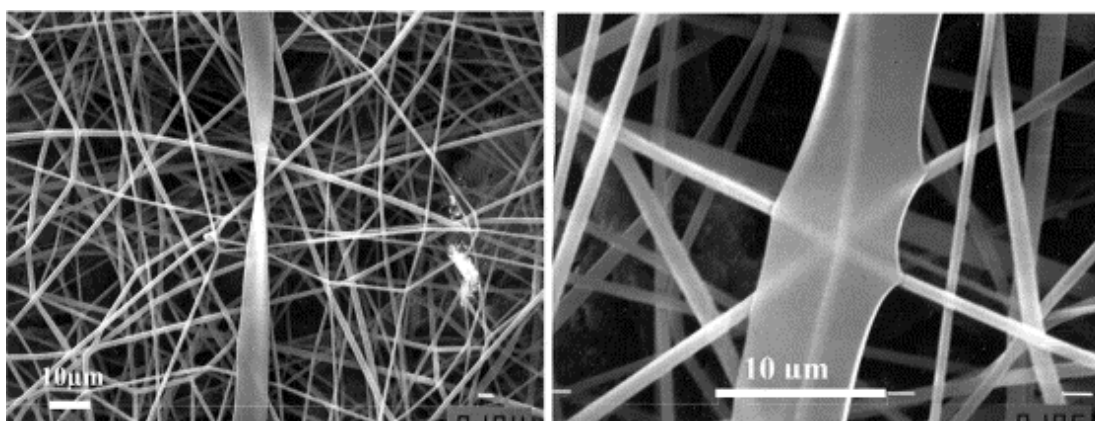
Následující studie [25] se zabývá vlivem koncentrace a molekulové hmotnosti polymeru na vzhled elektrostaticky zvlákněných vláken z polyvinylalkoholu. Experiment prokázal, že s rostoucí koncentrací roztoku se

zvětšuje vláknenný průměr , zvětšuje se také velikost mezivláknenných pórů a zároveň dochází k postupné tvorbě plochých vláken místo kruhových, Obr. 2.



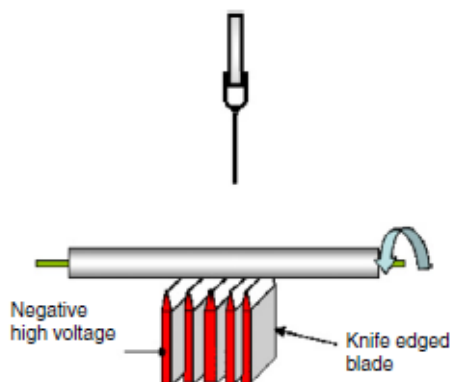
Obr. 2 Elektrostaticky zvlákněná vlákna plochého tvaru z roztoku PVA [25]

V práci [26] obdrželi Koombhongse, Liu a Reneker rozvětvená vlákna, která byla rozeklaná podélně z větších vláken. Dále obdrželi zakřivené pásy, ploché pásy a pásy jiných tvarů, Obr. 3. Na základě studií vlastností těchto tvarů průřezů vytvořených z různých druhů polymerů a rozpouštědel bylo dokázáno, že k formaci vláken přispívají také mechanické kapalinové efekty, elektrický náboj přenášení proudem a také odpařování rozpouštědla.



Obr. 3 Různé tvary získaných nanovláken , formace ploché pásy během procesu elektrostatického zvláknění polyetylen tereftalátu 13 hmotnostních % roztoku v 1:1 dichlorometanu a kyseliny trifluoroctové. [1]

Usměrněním elektrického pole pomocí kovových nožových elektrod se ve své studii zabývali Teo a Ramakrishna [13]. Tyto pomocné elektrody jsou umístěny pod válcovou elektrodou, Obr. 4.



Obr. 4 Rotující válcový kolektor s nožovými elektrodami ve spodní části [13]

Na válcové elektrodě se tak vytváří objemný, výrazně uspořádaný svazek nanovláken.

Publikace Ramakrishny, Fujihary a Tea [10] obsáhla různé studie o elektrostatickém zvlákňování a o nanovlákních. Píše se v ní o tom, že pokud je kolektorová deska vyrobena z vodivého uzemněného materiálu, bude se mezi zdrojem a kolektorem vytvářet stabilní potenciál. Pokud je ale kolektor vyroben z nevodivého materiálu, budou se vlákna ukládat daleko méně. Takováto vyrobená vrstva bude mít nižší plošnou hustotu než vrstva z vodivého povrchu. To způsobují odpuzivé síly z nahromaděných nábojů na nevodivém povrchu kolektoru. Na vodivém kolektoru je náboj rozptýlen, nikde se nehromadí, proto na kolektoru dochází k ukládání většího počtu vláken. Následkem odpuzivých sil způsobených náboji na vláknech může vzniknout trojrozměrná vlákenná struktura, která může mít vzhled medového plátu. Při použití vzorovaných kolektorů lze tedy pravděpodobně dosáhnout různé struktury vlákenné sítě.

V současné době patří proces elektrostatického zvlákňování k jedné z prudce se rozvíjejících nanotechnologií, které nacházejí uplatnění v různých oblastech lidské činnosti, např. v biomedicíně. Proto existuje mnoho výzkumů a studií, které se zabývají elektrostatickým zvlákňováním, zkoumáním různých druhů materiálů pro zvlákňování, podmínkách ovlivňující proces výroby nanovláken a dalších souvisejících záležitostí. Z tohoto důvodu je elektrostatické zvlákňování polymerů tématem mnoha studií na celém světě.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Jsou zde vysvětleny jednotlivé pojmy související s elektrostatickým zvlákňováním a představeny použité polymerní roztoky. Dále je zde vysvětlen pojem tkáňové inženýrství. V závěru teoretické části jsou popsány principy přístrojů a programů použitých k měření parametrů elektrostatického zvlákňování a k vyhodnocení výsledné struktury a rozměrů nanovláken vyrobených při experimentu.

2.1 Elektrostatické zvlákňování

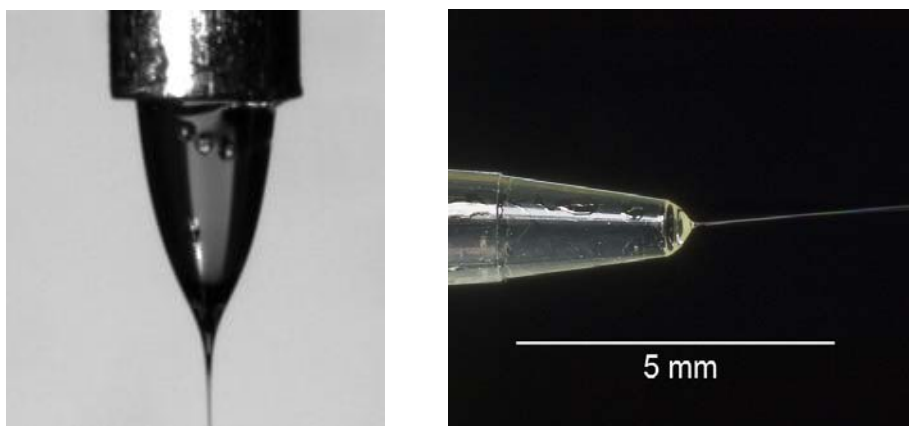
Existuje několik technik jak vyrábět vlákenné materiály s průměry vláken menšími než jeden mikrometr, ovšem zřejmě principiálně nejjednodušší postup je elektrostatické zvlákňování (electrospinning). Princip spočívá v samoorganizaci polymerního roztoku či taveniny do formy nanovláken jen s pomocí elektrického pole. Nanovlákná jsou tedy tvořena pomocí vysokého napětí a následně ukládána na sběrnou elektrodu. Vytváří se tzv. netkaná textilie. Elektrostaticky zvlákněná nanovlákná mají řadu dobrých vlastností, jako např. velký měrný povrch, a jsou používána v mnoha aplikacích [27, 28].

2.1.1 Princip procesu elektrostatického zvlákňování

Principem elektrostatického zvlákňování je využití stejnosměrného elektrostatického pole o vysoké intenzitě. Elektrostatické pole se tvoří mezi dvěma elektrodami, na které je přivedeno napětí. Elektrody jsou postaveny vzájemně proti sobě. Jednou z elektrod může být úzká kapilára a druhou plochý disk, který se nazývá kolektor. Podmínkou elektrostatického zvlákňování je existence rozdílu elektrických potenciálů. Polymerní roztok je vytlačován kapilárou, která je nabitá, tím je na ní vložen elektrický potenciál a dochází tak k přenosu náboje do roztoku polymeru.

V jiných případech může kapilára i rotovat pomocí odstředivé síly, která působí na konec trysky ve směru její osy ke kolektoru. Na polymerní roztok, který je uvnitř kapiláry, tak působí dvě síly. Coulombovská síla a odstředivá síla [28].

Coulombovská síla je daná již naneseným nábojem a způsobí energetické vytažení roztoku polymeru ke kolektoru. Dochází k vytvoření tzv. Taylorova kužele (Obr. 5). Jedná se o mikroskopický prostorový útvar, který je výslednicí coulombovských, viskozitních, mezipovrchových a popř. odstředivých sil, které se soustřeďují na vrcholu trysky. Díky viskozitě polymerního roztoku a existenci zapletených polymerních řetězců zůstává proud stabilní a nedochází tak k jeho transformaci do sférických kapek, jak se očekává u kapalinových válcovitých útvarů. Vytažené vlákno se od kolektoru dlouží a štěpí, přičemž dochází k obrovskému nárůstu povrchu a je spojen s rychlým vypařováním rozpouštědel. Na kolektor dopadají suchá vlákna, která mají již submikronové průměry. Náboj, který je nesen od kapiláry je vybit na kolektoru, který je uzemněn [28].

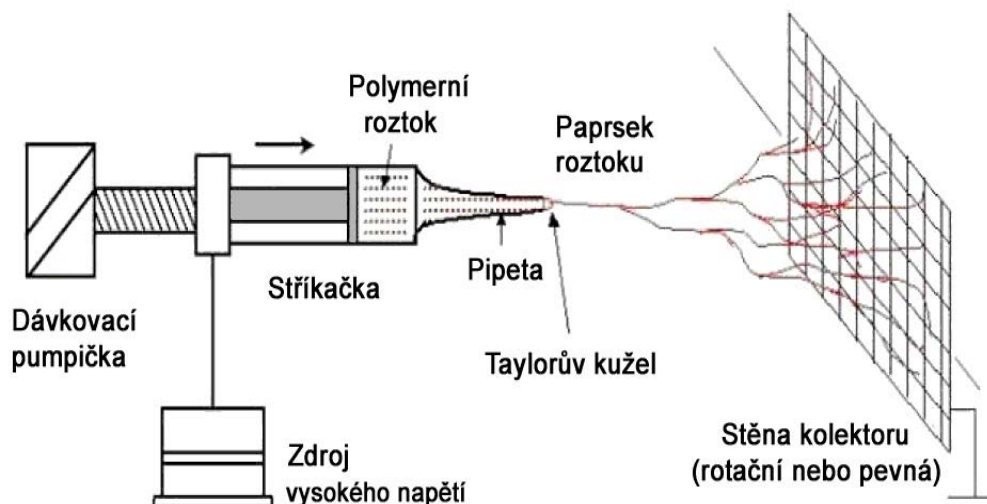


Obr. 5 Taylorův kužel [25]

2.1.2 Typy elektrostatického zvlákňování

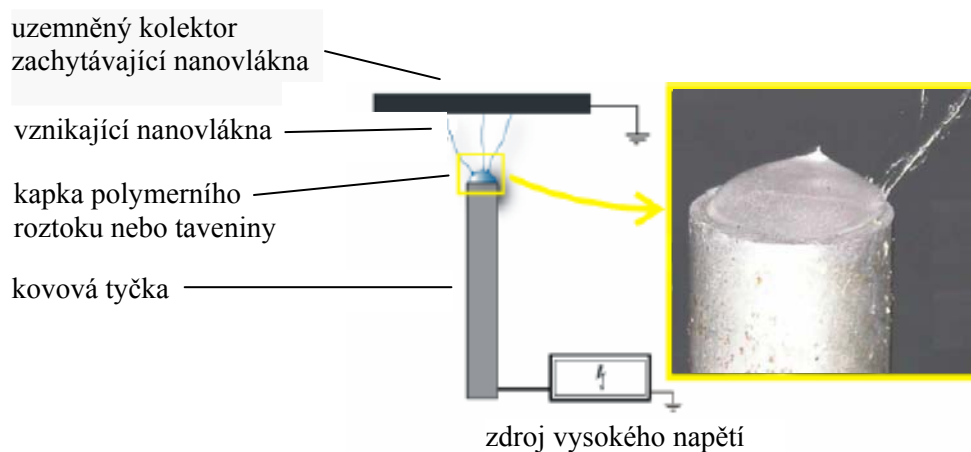
Existuje několik eventualit jak zvlákňovat a to pomocí různých typů uspořádání „*elektrospinnerů*“, jako je např.:

- **Zvlákňování z trysky** - novější princip zvlákňování polymerního roztoku za použití zvlákňovací hubice (Obr. 6), která je pod vysokým elektrickým napětím. Vytvoří se elektricky nabitý proud polymerního roztoku nebo taveniny. Ke zvlákňování polymerního roztoku dochází mezi kapilárou trysky a sběrným kolektorem [29].



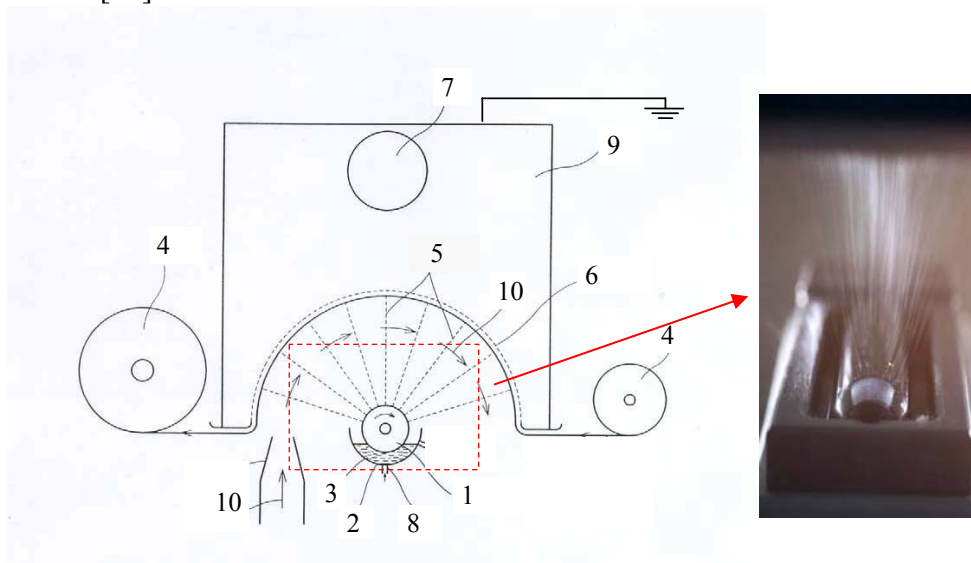
Obr. 6 Schématické znázornění procesu [29]

- **zvlákňování z „tyčky“** - zařízení slouží k elektrostatickému zvlákňování z kapky polymeru umístěné na válcové elektrodě, schéma je zobrazeno na Obr. 7.



Obr. 7 Schématické znázornění procesu a vznik Taylorova kuželu [72]

- **zvlákňování z „válečku“** (Obr. 8). Váleček tvoří princip metody Nanospider [30].



Obr. 8 Schématické znázornění principu zařízení Nanospider a vznik nanovláken [31]

Popis obr. 8. Spodní elektrodou je otáčející se kovový válec (1), který je vnořen do zásobníku (3) s polymerním roztokem (2). Válec je připojen ke zdroji vysokého napětí (8) a při rotačním pohybu nabírá na svůj povrch tenkou vrstvu polymeru. Na povrchu válce se vlivem účinku vysokého napětí vytváří Taylorovi kužely a dlouží se nanovlákná (5), elektrostaticky nabitý roztok je přitahován ke druhé uzemněné elektrodě (kolektoru) (6), která je uzemněna. Vlákna se ovšem neusazují na sběrači nýbrž na podkladové textili (4), která je vedena pod kolektorem. Komora přístroje (9) je vybavena odsáváním výparů (7) vzniklých po odpaření rozpouštědla a regulací klimatických podmínek. Do komory se může vhánět proud vzduchu (10).

Na katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci byl v roce 2003 vyvinut nový způsob elektrostatického zvlákňování, využívající Taylorův kužel. Zvlákňovací stroj, nazvaný „Nanospider“, umožňuje kontinuální výrobu celých vláknenných vrstev. Ostatními laboratorními metodami lze vyrábět pouze řádově setiny gramů nanovláken.

„Nanospider“

Tento systém má mnohem vyšší kapacitu, než dosud vyzkoušená zařízení elektrostatického zvlákňování. Žádné kapiláry a trysky, ale hladký váleček smáčící se v polymerním roztoku, který při zvlákňování vytváří hned několik Taylorových kuželů. Utvořená nanovláknena jsou zachycena na kolektor s podkladovou textilií (spun-bond či melt-blown) nebo bez ní. Výhodou tohoto systému je možnost kontinuálního navázání sušicí komory, ve které dochází k síťování nanosené nanovrstvy. Plošná hmotnost se pohybuje od 0.1 do 5 g/m² a produkce od 1 do 5 g/min na 1m pracovní šíře [23, 26].

Nevýhodou může být nesmáčitelnost nebo nesavost nanotextilie, neschopnost barvení textilie (velikost vlákna je menší než vlnová délka světla), malá pevnost nanosené vrstvy zapříčiněná jemností vláken.

Na kvalitu zvlákňování, tedy na počet a průměr nanovláken, má vliv více faktorů. Zvlákňování je podmíněno především druhem použitého zařízení a nastavení jeho parametrů, např. tvarem elektrody, velikostí elektrického proudu a napětí, druhem použitého polymeru a rozpouštědla, vodivostí roztoku, povrchovým napětím, koncentrací a viskozitou roztoku. Důležitou roli také hrají klimatické podmínky, zejména relativní vlhkost a teplota.

Některé z těchto faktorů spolu souvisí, ovšem je zatím obtížné teoreticky určit jak velký vliv má určitý faktor na průběh zvlákňování u určitého polymeru. Hledání optima je tedy spíše otázkou experimentálního měření

2.1.3 Parametry elektrostatického zvlákňování

Bylo zjištěno, že distribuce, morfologie a velikost vláknenných útvarů může být ovlivněna širokou škálou procesních a materiálových parametrů, proto se výzkum v posledních letech soustředil buď na hlubší pochopení electrospinningu nebo na optimalizaci. Všechny dosud známé parametry jsou shrnuty v Tab. 1 [28, 32].

PROCES	<i>velikost napětí</i>	tyto parametry ovlivňují intenzitu elektrického pole
	<i>vzdálenost a tvar elektrod</i>	
	<i>klimatické podmínky (teplota, rychlost a relativní vlhkost vzduchu)</i>	
	<i>rychlost vypařování rozpouštědla</i>	
	<i>rychlost podávání polymeru (u použití pipety jako dávkovače polymeru)</i>	
POLYMER	<i>molekulová hmotnost</i>	
	<i>tvar makromolekuly</i>	
	<i>teplota zesklnění</i>	
	<i>polydisperzita</i>	
ROZTOK	<i>viskozita</i>	
	<i>koncentrace polymeru v roztoku</i>	
	<i>typ rozpouštědla</i>	
	<i>povrchové napětí</i>	
	<i>rychlost toku</i>	
	<i>teplota</i>	
	<i>elektrická vodivost</i>	

Tab. 1 Parametry ovlivňující elektrospinning

2.1.3.1 Viskozita

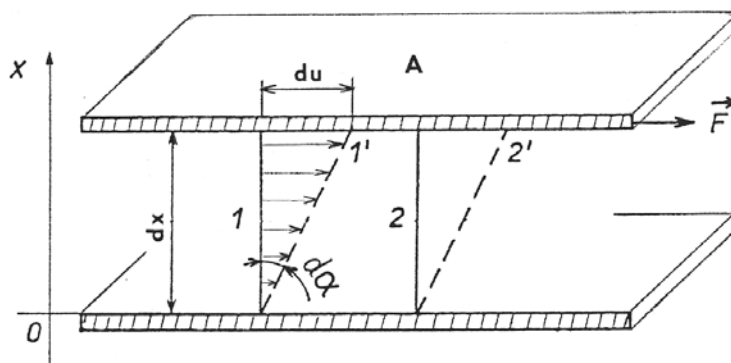
Viskozita je jedna ze základních charakteristik kapalného skupenství hmoty. Vyjadřuje odpor kapaliny vůči toku, je tedy projevem určitého tření v kapalině. Čím vyšší má kapalina viskozitu, tím méně ochotně teče.

2.1.3.1.1 Viskozita kapalin

V případě ideálně viskózního materiálu platí pro tečné napětí klasický Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad [\eta] = \text{Pa.s} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \quad (1)$$

kde konstanta úměrnosti η se nazývá dynamická viskozita [N.s.m^{-2}] charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny, τ je smykové napětí paralelní s laminárním tokem [Pa], du je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx a D je tzv. gradient rychlosti (rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině, Obr. 9.



Obr. 9 Rychlostní profil toku v proudící kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se vrstvou kapaliny [33]

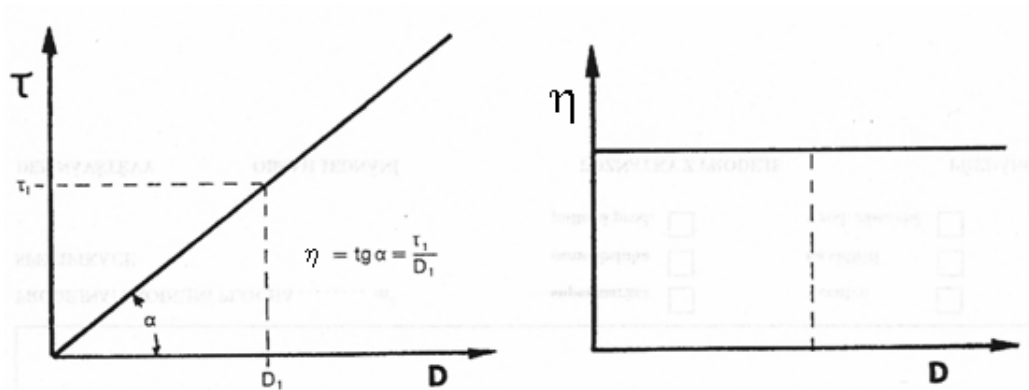
Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou, jejíž hodnota závisí na teplotě a tlaku. U plynů s teplotou roste, u kapalin naopak klesá. V soustavě SI je jednotkou pascal sekunda [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] = $\text{kg/m} \cdot \text{s}$. Převrácená hodnota dynamické viskozity $\varphi = 1/\eta$ se nazývá fluidita (tekutost) [34].

Podíl dynamické viskozity η a hustoty tekutiny ρ , se nazývá kinematická viskozita ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$\nu = \eta / \rho \quad (2)$$

Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů, závisících jak na viskozitě, tak na hustotě, např. při popisu hydrodynamiky kapalin.

Tekutiny pro které platí přímá úměrnost ve vztahu (1) nazýváme newtonské, řídící se Newtonovým zákonem a jsou to zpravidla nízkomolekulární látky. Viskozita těchto tekutin nezávisí na viskózním napětí a jejich toková křivka je znázorněna na obr. 10.



Obr. 10 Toková a viskózní křivka newtonské kapaliny [33]

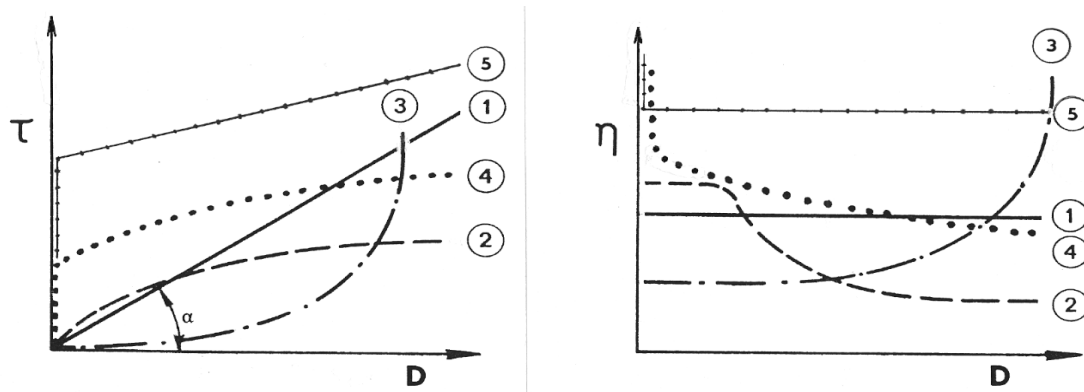
Vedle newtonských kapalin existují i kapaliny reologicky složitější, které se Newtonovým zákonem neřídí. Označují se proto jako **neneutronské kapaliny** a jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, různé pasty, suspenze. Platí pro ně analogicky s Newtonovým zákonem, kde η_z [Pa · s] je tzv. zdánlivá viskozita, která není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace D nebo tečném napětí τ

$$\tau = \eta_z \cdot D \quad (3)$$

K charakterizaci toku neneutronských kapalin je proto nutno znát průběh závislosti zdánlivé viskozity v širším intervalu D . Podle chování se dělí neneutronské kapaliny na několik základních typů [34]:

- pseudoplastické a dilatantní – viskozita je závislá na smykové rychlosti
- binghamské – kapaliny u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku
- tixotropní a reopexní – kapaliny s časově závislou složkou deformace, které mění zdánlivou viskozitu s dobou působení napětí

Polymerní roztoky patří mezi pseudoplastické kapaliny. U těchto látek se zdánlivá viskozita s rostoucím gradientem rychlosti snižuje, obr. 11. Podle průběhu tokové křivky se někdy rozlišují dvě podskupiny, pravé pseudoplastické kapaliny a strukturně viskózní kapaliny u nichž lze stanovit dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity, Obr. 11.



Obr. 11 Průběh tokových křivek neneutonských kapalin: 1- newtonská kapalina, 2- strukturně viskózní kapalina, 3- dilatantní kapalina, 4- pravá pseudoplastická kapalina (s mezí toku), 5- binghamská kapalina [33]

K měření viskozity se běžně používají průtokové, pádové a rotační viskozimetry, z nichž však pouze poslední typ a speciální kapilární viskozimetry umožňují dostatečně charakterizovat tokovou křivku neneutonských kapalin [34].

2.1.3.1.1 Viskozita roztoku makromolekulárních látek

Roztoky makromolekulárních látek jsou soustavy tvořené rozpouštědlem (disperzním prostředím – spojitá fáze) a makromolekulami (disperzním podílem – rozptýlená fáze). Soustavy, které obsahují alespoň dvě fáze nebo složky, se označují jako disperzní soustava. Podle velikosti částic je možné roztoky makromolekulárních látek zařadit mezi koloidní disperzní systémy (10^{-9} - 10^{-6} m).

Z hlediska jejich chování při toku patří roztoky makromolekulárních látek mezi neneutonské kapaliny. Pro vystižení odlišností od newtonského chování se při popisování viskozity disperzních soustav užívají tyto veličiny:

- **relativní viskozita η_r** – v případě koloidních disperzí je $\eta_r > 1$:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (4)$$

kde η je viskozita disperzní soustavy [Pa.s], η_0 viskozita disperzního prostředí [Pa.s],

- **specifická viskozita η_{sp}** – udává poměrný přírůstek viskozity:

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \quad (5)$$

- **redukovaná viskozita η_{red}** :

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (6)$$

kde c je koncentrace (hmotnostní, molární, objemový zlomek),

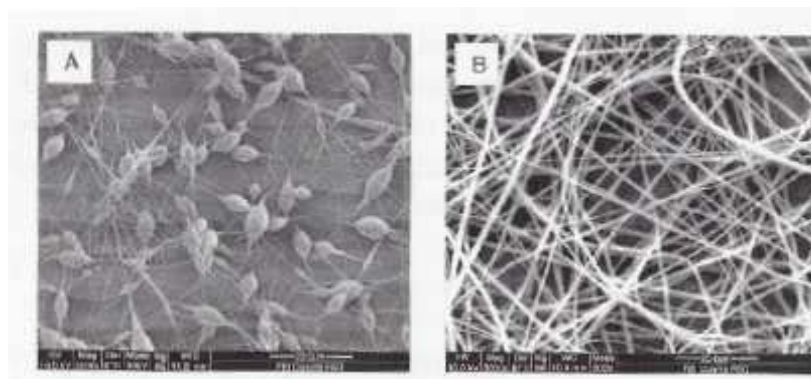
- **limitní viskozitní číslo $[\eta]$ [cm³.g⁻¹]**:

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (7)$$

Viskozita disperzních soustav se liší od viskozity čistého disperzního prostředí, což je způsobeno přítomností disperzního podílu (částic), rozměry jehož molekul jsou větší než rozměry molekul disperzního prostředí. Přítomnost částic mění dráhy jednotlivých molekul proudící kapaliny a napomáhá tak promíchávání vrstev [35, 36, 37, 34].

Jedním z faktorů, který ovlivňuje viskozitu polymerního roztoku je relativní molekulová hmotnost polymeru. Pokud se rozpustí polymer s nižší relativní molekulovou hmotností ve stejném rozpouštědle jako polymer s vyšší relativní hmotností, bude v druhém případě viskozita roztoku vyšší. Relativní molekulová hmotnost udává délku polymerního řetězce. Větší délka polymerních řetězců zvyšuje pravděpodobnost jejich zapletení, což má za následek vyšší viskozitu roztoku. Dalším eventuálním způsobem jak zvýšit viskozitu je zvýšení koncentrace polymeru v rozpouštědle.

Jednou z podmínek elektrostatického zvlákňování je dostatečná viskozita roztoku, při překonání kohezní síly silou elektrostatickou je roztok polymeru dloužen do vláken a právě zapletení polymerních řetězců zabraňuje rozbití Taylorova kuželu a udržuje kontinuální proces. Z tohoto důvodu se elektrostatickým zvlákňováním nedají vytvořit vlákna z monomerního roztoku. Zvýšení koncentrace roztoku má také za následek menší „perličkový efekt“ Obr. 12 [33].



Obr. 12 Nanovláknna kaprolaktanu A) Koncentrace 0,1 g/ml B) Koncentrace 0,12 g/ml. [10]

Avšak při příliš vysoké viskozitě roztoku vzniká technologický problém čerpaní roztoku ze zásobníku. Vlivem stoupající viskozity a molekulové hmotnosti dochází k většímu počtu zapletení polymerních řetězců, ty kladou vyšší odpor elektrostatické síle vydloužit vlákna a to vede k většímu průměru vláken. Dochází ale také k postupné tvorbě plochých vláken místo kruhových [38]. Vyšší viskozita může také odrazovat vznik sekundárních Taylorových kuželů, což se projeví na menším plošném nánosu nanovláken [20, 21, 22].

2.1.3.2 Povrchové napětí

Povrchové napětí je výsledkem vzájemné interakce přitažlivých sil molekul nebo atomů, z nichž se skládá povrchová vrstva kapaliny. Při elektrostaticém zvlákňování musí elektrostatické síly překonat povrchové napětí roztoku a vydloužit vlákna. Je-li povrchové napětí příliš vysoké, kapky roztoku si při zvlákňování udrží kulovitý tvar a v tomto tvaru zůstávají usazené na kolektoru i po odpaření rozpouštědla. Tento proces se již nenazývá electrospinning, ale „electrospraying“. Vysokému povrchovému napětí se také přisuzuje tvorba korálových defektů, takže redukcí povrchového napětí polymerního roztoku mohou být pozorována vlákna bez korálových defektů [17]. Povrchové napětí závisí na složení rozpouštědla a na

koncentraci polymeru. Různá rozpouštědla přispívají různým povrchovým napětím. Nižší povrchové napětí rozpouštědla ale není vždy vhodnější pro elektrostatické zvlákňování. Povrchové napětí lze snížit i přidavkem povrchově aktivní látky.

2.1.3.3 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost G [Siemens] je fyzikální veličina, která udává velikost elektrického proudu procházející vodičem při jednotkovém napětí na koncích vodiče. Elektrická vodivost popisuje schopnost dobře vést elektrický proud. Čím větší je vodivost, tím silnější elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí.

Čisté polymery jsou všeobecně známy jako izolanty, ale polymerní roztoky, jako směsi polymeru a rozpouštědla mají již velmi malou měrnou elektrickou vodivost. Elektrická vodivost roztoků je závislá na množství iontů obsažených v daném roztoku, tj. na jejich koncentraci, dále na velikosti náboje jednotlivých iontů, na teplotě roztoku a na tzv. pohyblivosti iontů v elektrickém poli. Elektrická vodivost roztoku se může zvýšit přidáním aditiva, látky které se přidávají kvůli zvýšení elektrické vodivosti jsou minerální soli, minerální kyseliny a karboxylové kyseliny. Vyšší vodivost má za následek zvýšení elektrostatické síly, která bude schopna vydloužit z roztoku vlákna menších průměrů. V určitém případě může přidání solí do roztoku zvýšit viskozitu roztoku, tedy ačkoliv je elektrostatická síla zvýšena, vzroste i kohezní síla, což má za následek větší průměr vláken [18, 19, 21].

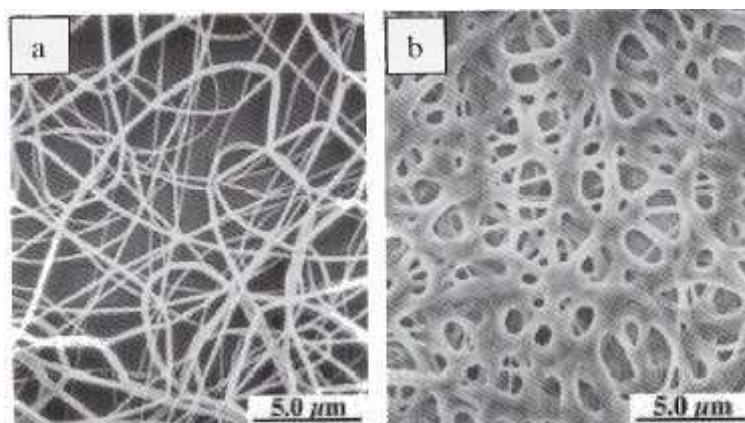
2.1.3.4 Vliv elektrického napětí

Další parametr, který významně ovlivňuje průměry vláken je aplikované elektrické napětí. Větší elektrické napětí vypudí více roztoku a výsledkem jsou větší průměry vláken [1].

Vlákna přenášejí náboj přes vzdálenost mezi nabitou jehlou a elektricky uzemněným cílem, uzavírajíc tak elektrický obvod. Elektrický proud je kvůli iontové vodivosti náboje v polymerním roztoku obvykle považován za zanedbatelný. Jediným mechanismem transportu náboje je proud polymeru z kapilární špičky k cíli. Pokud jsou vodivost, dielektrická konstanta a rychlost toku roztoku do kapilární špičky drženy konstantní, pak zvýšení elektrického proudu obecně odráží zvýšení hmotnostního průtoku z kapilární špičky k uzemněnému cíli [28].

2.1.3.5 Vzdálenost mezi elektrodami

Vzdálenost mezi elektrodami má velký význam na výslednou morfologii vláken. Aby se tvořila hladká vlákna, musí se z roztoku během letu mezi elektrodami většina rozpouštědla vypařit. Pokud bude vzdálenost mezi elektrodami příliš malá, rozpouštědlo se dostatečně nevypaří a může způsobit sloučení vláken do slepené vrstvy. Tento případ je vidět na Obr. 13. Tato spleť vláken může disponovat vyšší pevností ve výsledném výrobku, např. v implantátech nahrazujících poškozenou tkáň..



Obr. 13 Polyamid 6.6: Vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem a) 2 cm b) 0, 5 cm. [20]

Malá vzdálenost mezi elektrodami může způsobit tvorbu koráلكových defektů. K tomuto úkazu dochází nejpravděpodobněji kvůli zvýšené intenzitě elektrického pole, ke kterému dochází díky menší vzdálenosti mezi elektrodami. Zmenšování vzdálenosti má tedy stejný účinek jako zvyšování elektrického napětí. Větší vzdálenost mezi elektrodami zvyšuje čas, který potřebuje elektrostatičká síla k vydloužení vláken, ovšem na druhou stranu se vzrůstem vzdálenosti klesá intenzita elektrického pole. Z tohoto důvodu nemá změna vzdálenosti mezi elektrodami jednoznačný vliv na výsledný průměr nanovláken. [20, 14, 15]

2.1.3.5 Vliv molekulové hmotnosti polymerního roztoku

Molekulová hmotnost polymeru může mít vyznaný vliv na reologické vlastnosti. Průměr vláken se zvyšuje s molekulovou hmotností a koncentrací zvlákněvaného polymerního roztoku. Při nízké molekulové hmotnosti nebo koncentraci, vykazují vlákna kruhový průřez. Naopak při vysokých molekulových hmotnostech a koncentracích byly pozorovaná plochá vlákna [28].

2.1.4 Polymery používané pro elektrostatického zvlákňování

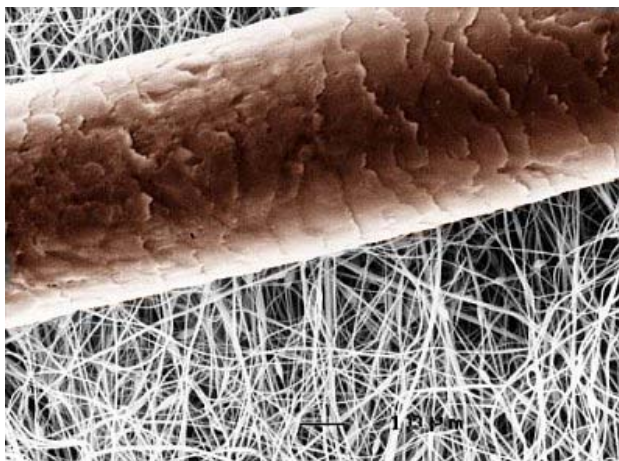
Pro elektrostatické zvlákňování se používají polymerní roztoky nebo polymerní taveniny, Tab. 2. Častěji jsou zvlákňovány polymery ve formě roztoku, protože vysoká viskozita polymerní taveniny neumožňuje tvorbu dostatečně jemných vláken. Elektroda vysokého napětí je přímo spojena s polymerním roztokem nebo taveninou. [28, 27].

Elektrostaticky zvlákňované polymery - roztoky	<i>polyacrylonitrile PAN, polyvinylalkohol - PVA, polyetylén-co-vinylacetat PEVA, polyamid PA, polyvinylchlorid PVC, polybenzimidazole – PBI, polystyrene PS,...</i>
Elektrostaticky zvlákňované polymery - taveniny	<i>Polyethylene PE, Polypropylene PP, Polyethylene terephthalat PET, ...</i>

Tab. 2 Příklady zvlákňitelných polymerů [28]

2.1.5 Nanovláknna

Nanovláknna jsou polymerní vlákna s průměry až tisíckrát menšími než je průměr lidského vlasu, Obr. 14.



Obr. 14 Spleť nanovláken v porovnání s lidským vlasem [71]

Jde o vlákna jejichž průměr se pohybuje v rozsahu nanometrů, uvádí se 50 – 1000 nanometrů, jsou to tzv. submikronová vlákna. Jsou tedy o několik řádů menší než vlákna vytvořená běžným způsobem zvlákňování, Tab. 3.

Typ vlákna	Vláknový průměr [μm]	Povrchová plocha vlákna vztažená na hmotnost [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
Nanovlákná	0,05	80
Meltblown vlákna	2	0,2
Spunbond vlákna	20	2

Tab. 3 Porovnání nanovláken s konvenčními vlákny [39]

Průměr nanovláken je výrazně menší než vlnová délka světla, takže je nelze vidět ani pod optickým mikroskopem, a k jejich pozorování a focení je potřeba speciální elektronový mikroskop. Ten umožňuje zobrazit polohu atomů na povrchu krystalové mřížky a funguje zároveň jako nástroj pro manipulaci s nimi.

Polymerní nanovlákná mohou mít mnoho výjimečných vlastností jako vysokou pórovitost a malou velikost pórů, transparentnost, ale hlavně mají vzhledem ke svým rozměrům obrovský měrný povrch a výborné mechanické vlastnosti v poměru ke své váze.

Vyrábí se z polymerních roztoků nebo tavenin, a to z více než 50 druhů polymerů. Pokud jsou připravovány z roztoků, dochází k jevu, kdy zbytkové rozpouštědlo v nanovlákněch umožňuje spojení vláken ve spleti kohezními vazbami. Vznikají působením silného elektrostatického pole na polymer. Touto technologií vznikají velmi jemná vlákna [28].

Aplikace nanovláken

- Kompozity (potenciálně dobrá pevnost na jednotku hmotnosti)
- Ochranné oděvy (ochranné obleky vojáků a hasičů, „dýchání-schopné“ textilie blokující chemikálie)
- Filtrace (silná bariéra proti průniku mikroorganismů a jiných malých částic)
- Separační membrány

- Biomedicína (např. s částicemi stříbra jsou nanovláknna antibakteriální, nabízí se tkáňové inženýrství, léčení popálenin, materiály, které mohou ochránit před viry a bakteriemi, dále krevní cévy, umělé orgány, systémy cíleného doručení léčiv, dýchací masky (roušky), ..)
- Kosmetika
- Aplikace pesticidů na rostliny
- Zvuková izolace (zde je jejich výhodou menší spotřeba materiálu, tedy i nižší hmotnost textilie)
- Nanovodiče, nanoelektrické aplikace jako plem řízené tranzistory a ultra-malé antény
- Nosiče chemických katalyzátorů

Předchozí aplikace byly čerpány z [22].

2.2 Elektrostatika

Elektrostatika se zabývá elektrostatickými poli. Elektrostatické pole je projevem účinku elektrických nábojů. Tyto účinky závisí na prostředí (vodivém/nevodivém). Elektrostatické pole vzniká kolem elektrického náboje v klidu v nevodivém prostředí. Elektrostatické pole je tedy prostředí v němž se projevují silové účinky elektrických nábojů, které jsou v klidu.

2.2.1 Elektrický náboj a Coulombův zákon

Jak bylo výše zmíněno, tělesa nabitá elektrickými náboji na sebe navzájem silově působí, protože je samozřejmé, že elektrický náboj je vázán na nějaké těleso. Abstrakcí lze zavést pojem bodového elektrického náboje, který je vázán na těleso, které můžeme pokládat za hmotný bod. (tj. zanedbat při daném popisu jeho rozměry). *Elektrické náboje* na sebe tedy navzájem působí silami. Velikost sil popisuje Coulombův zákon, která zní: Bodový náboj Q působí na jiný bodový náboj (jsou-li oba v klidu) silou \vec{F} [N], jejíž velikost je přímo úměrná součinu obou nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti mezi nimi r [m]. (Za bodové náboje můžeme považovat elektricky nabitě těleso, jehož rozměry jsou zanedbatelné.)

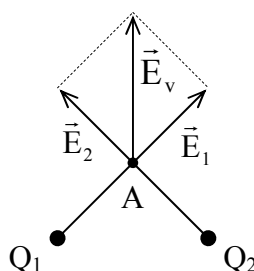
$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \quad (8)$$

kde k $[\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}]$ je elektrická konstanta úměrnosti, ϵ_0 je permitivita vakua respektive vzduchu a je rovna $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, ale častěji se tato konstanta udává v $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$, kde farad je jednotkou kapacity.

Směr síly, kterou na sebe působí dva náboje se určí podle druhu náboje. Dva stejně nabitě náboje se odpuzují, dva rozdílné náboje se přitahují.

Pokud se uvažuje s víc než dvěma náboji Coulombův zákon je doplněn ještě jedním zákonem. Tento zákon se nazývá *princip superpozice*. Překládá-li se v daném místě více elektrických polí o intenzitě $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$, potom se intenzita výsledného elektrického pole \vec{E}_v $[\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$ v daném místě rovná vektorovému součtu intenzit skládaných polí, Obr. 15 [40].

$$\vec{E}_v = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (9)$$



Obr. 15 Výsledná intenzita pole, které je tvořeno dvěma náboji

2.2.2 Vlastnosti a intenzita elektrického pole

Pole popisujeme pomocí fyzikálních veličin:

Vektorových: 1) Intenzita elektrostatického pole E
2) Indukce elektrostatického pole D

Skalárních: 1) Potenciál (napětí) pole V
2) Elektrostatický indukční tok pole ψ (psí)

Vektorové Fyzikální veličiny mohou mít v každém bodě pole jinou velikost, směr a orientaci. Skalární mají v každém místě pole stejnou velikost.

Intenzita elektrického pole je mírou silového působení pole v určitém místě na elektrický náboj. Je to veličina vektorová. Číselně se rovná síle, kterou působí na jednotkový kladný náboj v určitém místě pole. Intenzita má směr a orientaci síly, kterou síla působí na náboj [41].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad (10)$$

Jednotkou intenzity elektrostatického pole je $N \cdot C^{-1}$, častěji se však udává ve $V \cdot m^{-1}$, kde V je jednotkou elektrického potenciálu nebo napětí. Velikost a směr intenzity elektrostatického pole v daném bodě prostoru závisí na rozložení elektrických nábojů a na jejich hodnotách.

Je-li však pole vytvořeno několika bodovými náboji, výsledná intenzita \vec{E} se vypočítá jako vektorový součet jednotlivých intenzit (kap. 2.2.1).

Pokud je intenzita ve všech místech pole stejná, jedná se o homogenní (stejnorodé) elektrostatické pole. Je-li ale intenzita v různých částech pole rozdílná, je toto pole nehomogenní (nestejnorodé).

U intenzity pole s osamoceným bodovým nábojem dosazujeme do vzorce, místo druhého náboje, jednotkový náboj $q = 1C$. Za vzdálenost dosazujeme vzdálenost měřeného místa od osamocенého bodového náboje [41].

$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \quad [N] \quad (11)$$

Intenzita je pak silové působení osamocенého náboje na náboj jednotkový. Jednotkou je $[N \cdot C^{-1}]$.

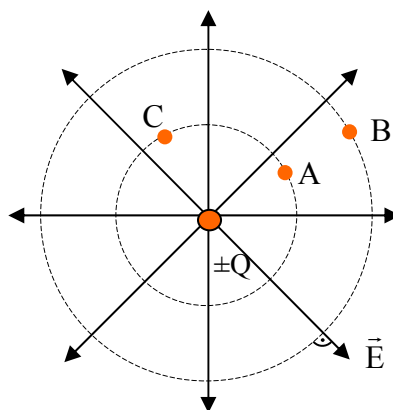
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (12)$$

2.2.3 Potenciál a napětí elektrického pole

Elektrický potenciál φ [V] určitého bodu elstatického pole je číselně roven práci W [J], vynaložené na přemístění kladného elektrického náboje Q [C] z místa s nulovým potenciálem do uvažovaného místa pole, platí potom

$$\varphi = \frac{W}{Q} \quad (13)$$

Největší potenciál je na povrchu bodového elektrického náboje Q . Se vzrůstající vzdáleností od náboje potenciál klesá. Nulový potenciál je v nekonečnu. V praxi se za nulový potenciál uvažuje země nebo vodič vodivě spojený se zemí. V každém bodě elstatického pole je určitý elektrický potenciál. Místa se stejným potenciálem tvoří tzv. ekvipotenciální hladiny, Obr. 16.



Obr. 16 Geometrické znázornění pole bodového náboje [41]

Potenciál v bodě A a C je stejný. Potenciál v bodech A a B je různý. U osamocené bodového náboje tvoří tyto hladiny povrchy koulí. Na přemístění náboje mezi místy s různými potenciály je třeba práce. Ta nezávisí na délce dráhy. Závisí pouze na počátečním a koncovém potenciálu dráhy [41].

$$W = Q \cdot (\varphi_A - \varphi_B) = Q \cdot \Delta\varphi \quad (14)$$

Elektrické napětí je číselně rovno práci vynaložené na přemístění jednotkového náboje mezi dvěma místy (body) v poli. Konají-li tuto práci síly pole, považuje se to za práci kladnou. Konají-li tuto práci vnější síly, považuje se to za

práci zápornou. Kladná je po směru pole, záporná proti směru. Elektrostatické napětí je rozdíl potenciálů dvou bodů pole [41].

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (15)$$

$$\text{Práce se pak vypočítá: } W = Q \cdot U \quad (16)$$

$$\text{V homogenním elektrostatického polí platí: } E = \frac{U}{d} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (17)$$

kde d je vzdálenost desek (elektrod) [41].

2.2.3 Metody určování elektrostatického pole

Určení rozložení elektrostatického pole v prostoru je snadné, pokud je dané rozdělení nábojů. Přítomností vodičů ale vznikají komplikace, neboť rozdělení náboje na vodičích není předem známé. Náboj se musí na povrchu vodiče sám rozdělit takovým způsobem, aby měl vodič všude stejný potenciál. Pro řešení takových úloh se používá nepřímá metoda, která spočívá v tom, že pro nějaké specifikované rozdělení náboje se naleznou ekvipotenciální plochy a jedna z nich se nahradí vodivým povrchem. Tento způsob poskytuje prostor pro speciální řešení vodičů ve tvaru koulí, rovin atd. Pokud nepatří úloha do třídy úloh, jejichž řešení jsou zkonstruovatelná nepřímou metodou, je nutné ji řešit přímější metodou [42].

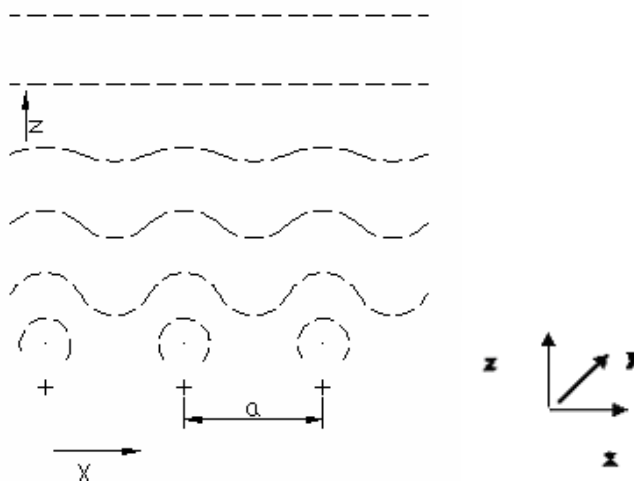
Z matematického hlediska spočívá přímá metoda v řešení Laplaceovy rovnice

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (18)$$

za podmínky, že φ nabývá vhodné hodnoty na površích vodičů. Úlohy v nichž má řešení diferenciální rovnice pole splňovat určité okrajové podmínky, se nazývají okrajovými úlohami. Je mnoho fyzikálních situací, kdy změny pole v jednom směru jsou nulové nebo zanedbatelné ve srovnání se změnami v druhých dvou směrech. Takovéto úlohy se nazývají *dvojrozměrné*. Pole v nich závisí pouze na dvou souřadnicích [42].

2.2.3 Elektrostatické pole mřížky

Ve vztahu k elektrostatickému zvlákňování má elektrické pole mnoho zajímavých vlastností. Jednou z nich je i charakter elektrického pole blízko mřížky z nabitých drátů. Tuto situaci si Feynman [42] zjednodušil. Uvažoval jen o řadě nekonečně dlouhých, rovnoběžných drátů, které leží v rovině a jsou od sebe stejně vzdálené, Obr. 17.



Obr. 17 Mřížka paralelních drátků – Ekvipontenciální plochy [42]

Bylo zjištěno, že elektrické pole s konstantní hodnotou intenzity se vyskytuje ve velké vzdálenosti nad rovinou drátů. Náboj jako kdyby byl v rovině rozdělen rovnoměrně. Charakter pole se odchyluje od výše zmíněné homogenity v blízkosti mřížky. Předmětem zájmu bylo tedy spočítat vzdálenosti od mřížky, v kterých se vyskytnou větší výkyvy potenciálu. Ze výsledků studie [42]. vyplývá, že čím blíže se nacházíme k mřížce, tím jsou výkyvy větší. Pokud se bude pohyb vykonávat rovnoběžně s mřížkou, bude pole kolísat periodicky. Ve vektorovém zápisu síla pole mezi dráty splňuje následující podmínky: $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$, kde \vec{E} je intenzita elektrického pole, $\vec{\nabla}$ je $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ a ϕ je potenciál. Tedy rovnice (18).

Uvážíme-li, že dráty mají jednotný náboj na jednotku délky a jsou orientované podle osy y , pak má-li jít o platný potenciál, musí v oblasti nad dráty, kde nejsou žádné náboje, splňovat Laplaceovu rovnici. Rovnice (18) je redukována na:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

Jsou-li dráty umístěny v rovině xy rovnoběžně s osou y , je možné úplné řešení (19) napsat ve tvaru

$$\varphi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n(z) \cos \frac{2\pi n x}{a} \quad (20)$$

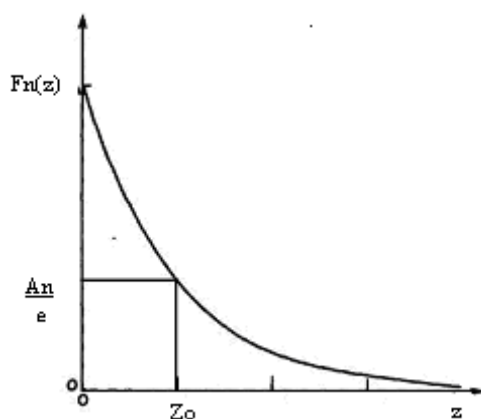
kde a je mezera mezi dráty, n je harmonický řád. Funkce $F_n(z)$ tedy splňovat vztah

$$\frac{d^2 F_n(z)}{dz^2} = \frac{4\pi^2 n^2}{a^2} F_n(z) \quad (21)$$

Řešení standardní diferenciální rovnice s konstantními koeficienty dává řešení:

$$F_n(z) = A_n \exp(-z/z_o) \quad (22)$$

kde $z_o = \frac{a}{2\pi n}$ vyjadřuje rychlost útlumu nehomogenity. Je to jakási charakteristická vzdálenost dosahu nehomogenit rozložení pole v okolí mřížky. Podle [42]. lze tedy říci, že bude-li existovat Fourierova složka pole s n -tou harmonickou, bude se potom s výškou nad mřížkou exponenciálně zmenšovat nehomogenita pole. Ta prakticky vymizí na charakteristické vzdálenosti z_o , Obr. 18.



Obr. 18 Pokles pole

Amplituda první harmonické ($n = 1$) se zmenší $e^{2\pi}$ -krát při vzrůstu z o jednu mřížkovou konstantu a . Dochází k prudkému poklesu. Další harmonické klesají při vzdalování od mřížky ještě rychleji. Z toho vyplývá, že jsme-li jen několik vzdáleností a od mřížky, je pole téměř homogenní, tj. oscilující členy jsou malé. Pokaždé tam ale zůstane pole nulové harmonické $\varphi_o = -E_o z$, které přechází v homogenní pole při velkém z . Úplné řešení lze dostat vypočítáním tohoto členu se sumou členů tvaru (20), přičemž F_n je použito ze vztahu (22). Koeficienty A_n musí

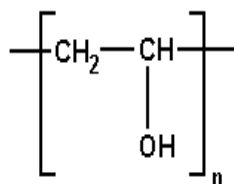
být zvoleny tak, aby výsledná suma po zderivování dala elektrické pole, které odpovídá hustotě náboje τ na drátech tvořících mřížku [42]. I s nehomogenitami projevujícími se na velmi krátkou vzdálenost od mřížky, jsme schopni efektivně ovlivňovat ukládání vláken na strukturovaných kolektorech, které jsou podobné mřížce.

2.3 Použité polymery

Polymery jsou makromolekulární látky. Makromolekulární látkou rozumíme sloučeninu organickou nebo anorganickou, jejíž atomy jsou spojeny hlavními (kovalentními) vazbami do řetězců, jejichž relativní molekulová hmotnost je minimálně 10^3 [-]. [37]

2.3.1 Polyvinylalkohol (PVA)

Polyvinylalkohol je syntetický hydrofilní polymer, který je rozpustný ve vodě a má relativně jednoduchou chemickou strukturu s opakující se hydroxylovou skupinou. Je velmi zajímavý svými speciálními vlastnostmi, které jsou prospěšné zejména v biomedicíně a pro farmaceutické aplikace. Podrobnosti týkající se struktury, vlastností, krystalizace a aplikací popisuje podrobně např. Finch, C. A. (1973). V experimentu byl polyvinylalkohol použit jako hlavní zkušební polymer ke zvláknění na navržené elektrody. Proto bude blíže popsána výroba, struktura a vlastnosti tohoto polymeru.



Obr. 19 Stavební jednotka PVA

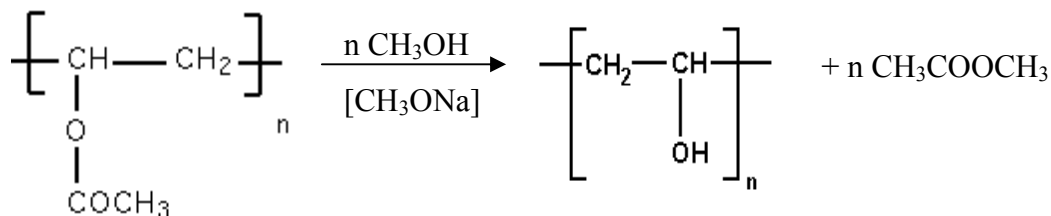
2.3.1.1 Výroba, struktura a vlastnosti PVA

Polyvinylalkohol nelze získat polymerací monomeru vinylalkoholu, neboť vinylalkohol je nestálá látka, která přechází na stabilnější formu a to na acetaldehyd, Obr. 20. Děje se tak přesmykem vodíku z hydroxylové skupiny alkoholu, která je vázána na uhlíkový atom, ze kterého vychází dvojná vazba. Tudíž vinylalkohol vlastně neexistuje [36, 35].



Obr. 20 Schéma přechodu vinylalkoholu na acetaldehyd [36]

PVA se získává zmýdelněním nebo reesterifikací polyvinylacetátu v metanolu, Obr. 21. To je důvod, proč polyvinylalkohol obsahuje vždy určité množství polyvinylacetátových skupin, které tento polymer modifikují a jsou příčinou jeho dost proměnlivých vlastností. Jednu z vlastností, kterou tyto nezhydrolyzované skupiny polyvinylacetátu ovlivňují, je odolnost PVA vůči rozpouštědlům. Pokud má polymer více jak pětiprocentní obsah vinylacetátových jednotek, rozpouští se ve vodě jen při teplotách nad 65°C. Rozpouštění polymeru tedy závisí na teplotě a střední molekulové hmotnosti. Čím vyšší je molekulová hmotnost PVA, tím hůře se rozpouští [43].

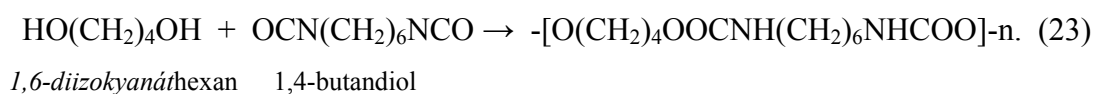


Obr. 21 Vzorec alkalické reesterifikace v metanolu [43]

2.3.2 Polyuretany (PUR)

Polyuretany patří do rozsáhlé skupiny polyesteramidů (z chemického hlediska jsou kombinací polyesterů a polyamidů). Ve své strukturní jednotce obsahují charakteristické seskupení atomů –NH-CO-O-.

Polyuretny lze připravit z různých vícefunkčních izokyanátů a látek obsahující hydroxylové skupiny. Nejvýznamější je druh lineárního polyuretanu vyráběný polyadici z diizokyanátu a diolu. Tento druh polyuretanu byl připraven z alifatického hexametylendiizokyanátu a 1,4- butylenglykolu:



Oproti polyamidům mají polyuretany nižší navlhavost, lepší odolnost vůči působení vody, kyselin a lepší elektroizolační vlastnosti. Za chladu jsou rozpustné ve fenolech, kyselině mravenčí a sírové. K normálním textilním účelům se příliš nehodí. Vlákná polyuretanů jsou drsná na omak, příliš rychle krystalizují, neochotně se barví a velmi rychle se nabíjejí statickou elektřinou [23].

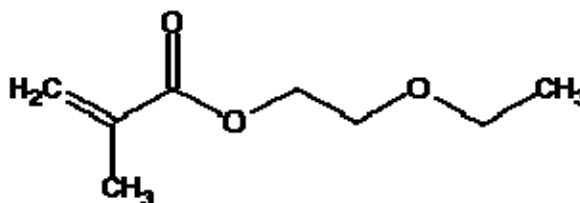
V případě sloučení více jak dvojfunkčních, je možné připravit polymery s různým stupněm zasíťování a rozvětvení. Tak vznikají syntetické látky, které se svými fyzikálními vlastnostmi mění od měkkých elastomerů a po tvrdé nebo i křehké, teplem tvrditelné plastické hmoty. Změnou stupně rozvětvení je tedy teoreticky možné vyrobit plastické hmoty jakéhokoli typu, od termoplastů až po termosety [44].

PUR vlákna se vyrábí převážně ve formě hedvábí. Tvoří skupinu tzv. elasthanových vláken. Z chemického hlediska jde o tzv. segmentovaný polyuretan, skládající se z měkkých a tvrdých segmentů. Tato molekulární struktura dodává vláknům výjimečné elastické vlastnosti. PUR vlákna se vyznačují velkou pružností. Při zatížení je lze roztáhnout až na sedminásobek původní délky. Po povolení napětí se vrátí do původního stavu. Vláknem je velmi pevné a lehké. Dobře odolává působení potu, slané vody i opakovanému praní [24].

2.3.3 Poly(2-ethoxyethyl methakrylat) – (PEOEMA)

2-ethoxyethyl methakrylát je hydrofóbní kopolymer, který má vzorec $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$. Vyznačuje se výbornými elektrochemickými a mechanickými vlastnostmi. Oproti pevným polymerním elektrolytům má vyšší iontovou vodivost a vyšší bezpečnostní vlastnosti v porovnání s běžnými tekutými elektrolyty, proto se hodí jako gelový elektrolyt do lithiových baterií [66].

Na Obr. 22 je struktura 2-ethoxyethylen methakrylatu od firmy Bimax, který má vzhled průzračné kapaliny, molární hmotnost $158 \text{ [g.mol}^{-1}\text{]}$, čistotu 99,7 [%], vlhkost 0,05 [%], koncentrace methakrylové kys. 0,04 [%] a inhibitoru (MEHQ) 20 [%].



Obr. 22 Struktura 2-ethoxyethylen methakrylatu [65]

2-ethoxyethylen methakrylat se využívá např. v lithiových bateriích, superkondenzátorech, elektrochromatických zrcadlech, kontaktních čočkách [67], v medicíně (nanovláknena) [68], atd.

2.4 Tkáňové inženýrství

Tkáňové inženýrství je nově vznikající biotechnologickou disciplínou na pomezí medicíny, buněčné i molekulární biologie, nauky o materiálech a inženýrství. Řečeno velmi stručně, jedná se o návrh, specifikaci a vytváření buněk, biologických materiálů nebo biomolekul s cílem obnovit nebo modifikovat biologické funkce tkání.

2.4.1 Základní pojmy tkáňového inženýrství

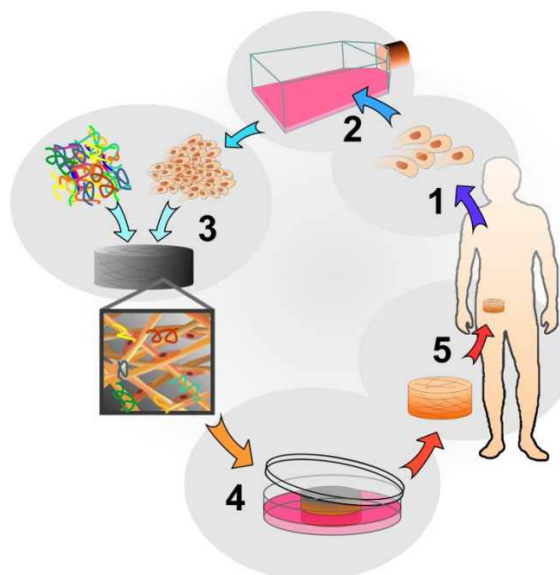
- *Biokompatibilita* – schopnost implantovaného materiálu snášet se s živým organismem, implantát tedy nevytváří odezvu na povrchu ani ve struktuře

tkáně. Pokud by implantát nebyl biokompatibilní, hrozilo by spuštění obranné reakce imunitního systému.

- *Biodegradabilita* - je specifická vlastnost daného materiálu, která definuje jeho kompletní biologickou rozložitelnost a vstřebatelnost v organismu
- *Scaffold* – slovo scaffold v překladu znamená lešení. Slouží pro pěstování tkáňové kultury buněk. Z obecného hlediska to může být nervová tkáň, kostní tkáň, jaterní buňky nebo chrupavka. Scaffold se osází buněčnou kulturou daného pacienta a vypěstuje se na něm in-vivo jeho vlastní tkáň. Podstatou je laboratorně vytvořit a vyvzorovat scaffold z vhodného materiálu a vhodné struktury. Většinou je scaffold vyroben z biodegradabilních polymerů, které se v těle pacienta za nějaký čas vstřebají. K tomu dojde poté, co splnil svoji podpůrnou roli pro růst buněk. Vznikne tak téměř plnohodnotná lidská tkáň.
- *In-vivo* – jde o experimentální metoda, které probíhají v nebo na žijící tkáni nebo v celém žijícím organismu
- *In-vitro* - jde o experimentální metoda, při níž biochemické resp. biologické děje probíhají mimo živý organismus a to např. ve zkumavce
- *Extracelulární matrix (EM)* – mezibuněčný prostor mezi tkáněmi, který slouží k adhezi buněk a jejich organizaci

2.4.2 Princip tkáňového inženýrství

Podstatou tkáňového inženýrství je návrh trojrozměrné funkční a živé tkáně, která je tvořená ze živých buněk in vitro. Buňky jsou spojené tzv. „živou půdou“ nebo pomocným „lešením“ - scaffoldem. Scaffold ovlivňuje vývoj tkaniva [70]. Po vytvoření nové tkáně je scaffold chirurgicky umístěn v těle. Pokud je potřeba obnovit poškozenou tkáň in vitro, používají se biokompatibilní uměle vyrobené struktury nebo implantáty z živých buněk, které jsou zavedené do nebo blízko oblasti poškození [45]. Na Obr. 23 je znázorněný průběh procesu tkáňového inženýrství.



Obr. 23 Kultivace buněk [73]

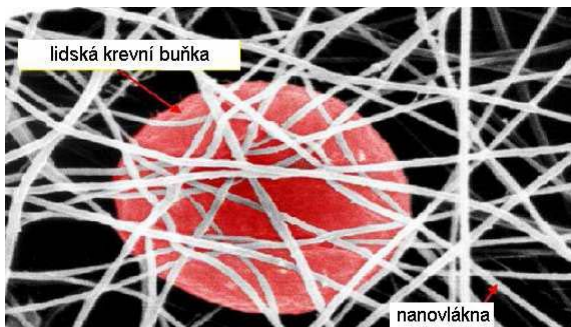
Popis Obr. 23: Odebrání tzv. autologních buněk (1), nárůst počtu buněk kultivací *in-vitro* (2), nasazení buněk na vhodný scaffold s odpovídajícími růstovými faktory a proteiny (3), kultivace tkáně *in-vitro* (4), implantace vytvořené tkáně (5).

2.4.3 Scaffoldy pro tkáňové inženýrství

Scaffoldy mohou být pletené, tkané, z netkaných textilií nebo pěn. Do netkaných textilií patří vlákna vyrobená elektrostatickým zvlákňováním. Struktura nosičů vyrobených elektrostatickým zvlákňováním je velmi podobná struktuře mezibuněčné hmoty (EM) lidské tkáně, což umožňuje její široké využití v biomedicíně.

Extracelulární matrix (EM) je mimo buněčnou základní hmota, která hraje důležitou roli v komunikaci mezi buňkami, transportu živin, ve výstupu produktů a metabolitů, v obranné bariéře (pronikající mikroorganismy) a v hojení poškození [69].

Polymery používané v procesu elektrostatického zvlákňování jsou biokompatibilní nebo biodegradabilní. Z nich vyrobené nosiče jsou používány jako náhrada strukturálně nebo fyziologicky nedostatečné tkáně a orgánů v lidském těle, například jako umělé krevní cévy, chlopně, náhrady kostní tkáně, nervové tkáně, náhrady chrupavek a další. Nanovlákna mohou díky svým malým rozměrům zachytit lidské buňky a kontrolovat směr jejich buněčného růstu, Obr. 24.



Obr. 24 Lidská krevní buňka ve spleti nanovláken. [46]

Požadavky kladené na scaffold

FUNKCE SCAFFOLDU	NAVRHOVANÉ PARAMETRY SCAFFOLDU
Nevyvolával zánětlivé reakce nebo toxické reakce " <i>in vivo</i> ".	Musí být biokompatibilní, netoxický a nekarcinogenní.
Napomáhat v růstu 3D tkaniva.	Specifický tvar 3D scaffoldu.
Rovnoměrná velká hustota naočkovaných buněk.	Vysoká poróznost a propojení mezi póry.
Poskytnout vhodný povrch pro adhezi a rozptřeni buněk.	Optimálně chemické a povrchové vlastnosti použitého polymeru. Velký specifický povrch.
Podpořit proliferaci a migraci buněk v celém scaffoldu.	Optimální velikost pórů umožňuje buňkám pohyb a komunikaci. Dynamické nasazení buněk.
Přímá orientace buněk.	Regulovatelná orientace vláken uvnitř scaffoldu, chemická úprava povrchu.
Umožňuje přesunu živin a odpadních látek ve scaffoldu.	Vysoká poróznost a propojení mezi póry, elasticita materiálu.
Odbouratelnost scaffoldu.	Degradační rychlost se rovná rychlosti formování tkaniva. Produkty degradace polymeru nemůžou být toxické ani podporovat zánět " <i>in vivo</i> ".
Zachovat si tvar " <i>in vivo</i> " s dostatečnou mechanickou pevností.	Scaffold má podobné mechanické vlastnosti jako rozvíjející se tkáň.

Tab. 4 Požadavky kladené na scaffold

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl experimentu a jejich průběh

Cílem experimentu bylo navrhnout kolektor pro elektrostatické zvlákňování objemných vrstev. Pro výrobu nanovláknenných vrstev lze použít různé tvary kolektorů, které vyplývají z rozmanitých návrhů tkáňových konstrukcí a to podle jejich operačních požadavků. Pro tkáňové inženýrství je jemná struktura nanovláken ideální, proto bylo zapotřebí vytvořit nanovláknennou vrstvu s co nejjemnějšími vlákny, ale taky s minimálním výskytem nežádoucích strukturních útvarů a případně snadným způsobem oddělení nanovláknenné vrstvy z povrchu navrženého kolektoru.

Vyrobené vrstvy nanovláknenných materiálů dále analyzovat pomocí elektronové mikroskopie a zjistit, jestli vyrobená trojrozměrná nanovláknenná struktura bude vhodná jako nosič buněk ve tkáňovém inženýrství. Zvlákňování bylo prováděno na zařízení s válečkovou spodní elektrodou.

Průběh experimentu:

- Návrh série kolektorů vhodných pro výrobu nanovláknenné vrstvy pomocí elektrostatického zvlákňování
- Výroba navržených kolektorů
- Příprava roztoků
 - 12 hmot.% PVA (dále jen 12% PVA) ve směsi s H_3PO_4 , glyoxalem a destilovanou vodou
 - 15 hmot. % PUR (dále jen 15% PUR) ve směsi s DMF, solí TEAB a destilovanou vodou
 - 10 hmot. % PEOEMA (dále jen 10% PEOEMA) ve směsi etanolu, acetonu a nasyceného roztoku NaCl
- Elektrostatické zvlákňování roztoků metodou Nanospider
- Vytvoření snímků nanovláknenných vrstev pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu VEGA TS 5130.
- Zpracování snímků nanovláknenných vrstev softwarem NIS Elements AR 3.0 – měření průměrů vláken, velikosti pórů a zaplnění vyrobených vrstev

3.2 Použité polymerní roztoky

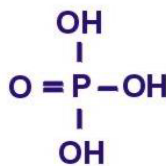
U experimentů byly použity tři druhy roztoků polymerů a to z důvodu porovnání chování polymerů při zvlákňování na navržené kolektory. Do polymerních roztoků byly přidány síťovadla, která jsou dále také uvedena. Síťovadla se přidávají jako další nezbytný reakční krok pro stabilizaci proti rozpouštění. Síťováním se rozumí vzájemné spojení řetězců kovalentními vazbami. Jakmile dosáhnou kovalentní vazby kritické hodnoty, stává se polymerní síť nerozpustná ve všech rozpouštědlech. Jelikož polymerní řetězce jsou charakteristické velkou délkou, postačuje k vytvoření trojrozměrné sítě jen malé množství síťujícího činidla. Tedy čím vyšší je molekulová hmotnost polymeru, tím menší je potřebné množství síťovadla.

3.2.1 Roztok PVA

Polyvinylalkohol byl v podobě 16 % vodného roztoku označeného pod obchodním názvem Sloviol® R. Jeho dodavatelem jsou Novácké chemické závody. Relativní molekulová hmotnost Sloviolu® R se dle [47] pohybuje v rozmezí od 60 000 – 100 000, stupeň hydrolýzy se pohybuje od $80 \pm 8 \%$, viskozita roztoku 2747 cSt, povrchové napětí 37,14 N/m, měrná vodivost 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a stupeň polymerace 1050 - 1150. PVA lze síťovat několika způsoby: esterifikační reakcí, pomocí aldehydů nebo gama zářením. Další údaje o PVA jsou uvedeny v kapitole 2.2.

3.2.1.1 Kyselina fosforečná

Tato trojsytná kyselina se správně nazývá trihydrogenfosforečná, popříp. kyselina orthofosforečná. V její struktuře jsou tři hydroxylové skupiny (-OH) schopné odštěpit proton,. Jeden atom kyslíku je vázaný přímo obr. 25. Sumární vzorec kyseliny fosforečné je H_3PO_4 .



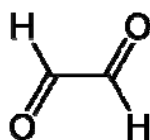
Obr. 25 Vzorec kyseliny fosforečné [48]

Jedná se o středně silnou kyselinu, kterou za normálních podmínek tvoří bezbarvé, tvrdé, kosočtverečné, hygroskopické krystalky. Jejich rozpouštěním ve vodě vzniká 85 % roztok. Tvoří tři řady solí a to fosforečnany, hydrogenfosforečnany a dihydrogenfosforečnany [49].

V experimentu byl použit 80 % roztok kyseliny fosforečné o molární hmotnosti 98, 0 [g/mol], který sloužil jako síťovací prostředek.

3.2.1.2 Glyoxal

Glyoxal je velmi reaktivní organická sloučenina jejíž sumární vzorec je $C_2H_2O_2$. Jedná se o nejjednodušší dialdehyd (dvě aldehydové skupiny $-CHO$) obr. 26. Patří mezi karbonylové sloučeniny, které obsahují v molekule dvou vaznou karbonylovou skupinu $-CO-$ [50].



Obr. 26 Vzorec glyoxalu [51]

V monomerní formě představuje žlutou kapalinu (bod tání $15^{\circ}C$), která velmi snadno přechází v tuhý bezbarvý polymer. Depolymerizací na monomer se provádí destilací s kyslíčným fosforečným. Ve slabě alkalickém prostředí podléhá Cannizarově reakci, přičemž vzniká alkalická sůl glykolové kyseliny. Ve větších množstvích se připravuje katalytickou dehydrogenací ethylenglykolu na měděném katalyzátoru [52].

Pro experiment byl použitý 40 % roztok glyoxalu s molární hmotností 58, 04 [g/mol], který sloužil jako síťovací prostředek.

3.2.2 Roztok PUR

Pro experiment byl použit 15%-ní roztok polyuretanu v dimethylformamidu od italské firmy Novotex [63] s obchodním názvem LARITHANE LS 1086TM (nyní změněný na LARITHANE AL 286) [53]. Jedná se o polymer složený z lineárního dvojsytného alkoholu, alifatického diisokynátu a alifatického diaminu. Parametry LARITHANE LS 1086TM jsou uvedeny v Tab. 5.

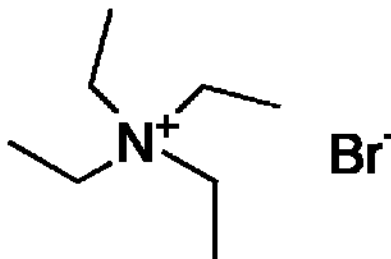
Parametr	Jednotka	LARITHANE LS 1086 TM
Sušina	% hmot.	30 ± 1
Molek. hmotnost	x	50000
Rozpouštědlo	x	DMF
Měrná vodivost	μS.cm ⁻¹	25

Tab. 5 Parametry LARITHANE LS 1086TM.

3.2.2.1 Tetraethylammonium bromide (TEAB)

- sůl použitá v roztoku. Jde o světlý krystalický prášek (C₂H₅)₄NBr o hustotě 1400 kg/m³, pH 8, teplotě rozkladu 286°C a relativní molekulové hmotnosti Mr = 210,16 [54].

- nasycený roztok 3,9%

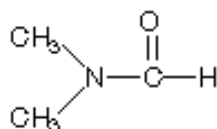


Obr. 27 Vzorec TEAB [56]

3.2.2.2 N,N-dimethylformamide (DMF)

DMF je použité rozpouštědlo v roztoku. Má vzhled kapaliny a je mísitelné s vodou. Je to jedno z hlavních polárních organických rozpouštědel používaných při běžných chemických reakcích. Má vysoký bod varu. Je toxický a proto zdravý velmi škodlivý.

Vzorec DMF je HCON(CH₃)₂, hustota 944 kg/m³, bod varu 155 °C, molární hmotnost 73,09 g/mol [50].



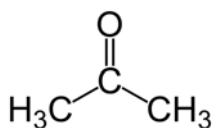
Obr. 28 Vzorec DMF [55]

3.2.3 Roztok Poly(2-ethoxyethyl methakrylatu) – (PEOEMA)

Pro experiment byl použit 10%-ní roztok hydrofobního kopolymeru 2-ethoxyethyl methakrylátu. Jako rozpouštědlo byl použit ethanol abs./ aceton (90:10 hmot.). Těsně před zvlákněním byla vodivost roztoku upravena přidáním cca. 8 kapkami NaCl nasyceného roztoku na 50ml roztoku kopolymeru. Další údaje o EOEMA jsou uvedeny v kapitole 2.3.3.

3.2.3.1 Aceton (dimethylketon)

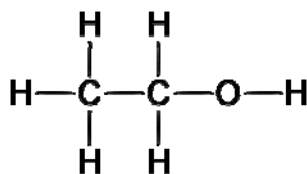
Aceton je bezbarvá kapalina specifického aromatického zápachu, lehce vznětlivá, s vodou neomezeně mísitelná. Velmi rychle se odpařuje, páry jsou těžší než vzduch. Směsi par se vzduchem jsou výbušné. Používá se jako rozpouštědlo organických látek. Aceton je nejjednodušší keton jehož vzorec je $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$. Charakteristickou skupinou je karbonyl, která způsobuje reaktivitu acetonu. Aceton se vyrábí oxidací propan-2-olu. [57]



Obr. 29 Vzorec acetonu [57]

3.2.3.2 Etanol (ethylalkohol)

Je to bezbarvá kapalina ostré, ale po zředění příjemné alkoholické vůně, která je základní součástí alkoholických nápojů. Je snadno zápalný. Etanol má vzorec $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ a je to druhý nejnižší alkohol.



Obr. 30 Vzorec ethanolu [58]

Bod varu (78,3 °C) této látky je vyšší, než by se dalo očekávat. Na svědomí to má přítomnost hydroxylové skupiny OH v molekule, jejíž vodíkový atom může vytvářet vodíkovou vazbu s kyslíkovým atomem jiné molekuly ethanolu. Molekula ethanolu je polární, protože vazby C–O i O–H jsou polární. Rozpouští se proto jen velice špatně v nepolárních rozpouštědlech, s polárními rozpouštědly (např. s vodou) se většinou mísí neomezeně.

Nejčastěji se ethanol připravuje z jednoduchých sacharidů (cukrů) alkoholovým kvašením za působení různých druhů kvasinek.



Synteticky se ethanol připravuje katalytickou hydratací ethenu (etylenu). Jako katalyzátor se používá kyselina trihydrogenfosforečná na oxidu křemičitém. Takto připravený ethanol má mnohem méně nečistot než kvasný a je tedy kvalitnější.



Další způsob syntetické přípravy spočívá v katalytické hydrogenaci acetaldehydu, který může být průmyslově vyráběn hydratací acetylenu [58]:



3.2.3.3 Chlorid sodný(NaCl)

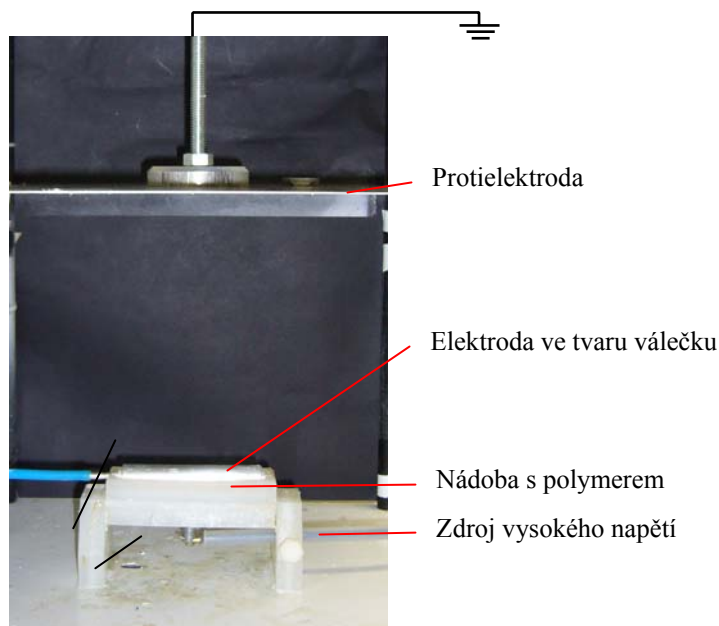
V přírodě se vyskytuje v podobě nerostu halitu, známého též pod názvem sůl kamenná. Krystalický chlorid sodný je bezbarvý nebo bílý, průhledný, skelně lesklý a má krychlovou odlučnost. Dobře se rozpouští ve vodě, proto je většina chloridu

sodného přítomného na Zemi obsažena v mořské vodě. V chemickém průmyslu je surovinou pro výrobu sodíku, jedlé sody, kyseliny chlorovodíkové, chlóru a mnoha dalších sloučenin.

3.3 Popis použitých zařízení, laboratorních přístrojů a programů v experimentu

3.3.1 Zařízení pro elektrostatické zvlákňování

Pro zvlákňení všech roztoků byla použita metoda Nanospider vyvinutá na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Pro experiment bylo použito zvlákňovací zařízení s dolní elektrodou ve tvaru vertikálně orientovaného kovového válečku. Na Obr. 31 je použité zvlákňovacího zařízení.



Obr. 31 Laboratorní zařízení "Nanospider"

Princip zařízení Obr. 31: Do zásobníku roztoku byl umístěn zvlákňovací kovový váleček o průměru 20 mm a délce 200 mm, který byl napájen stejnosměrným napětím. Váleček se otáčel nastavenou rychlostí 3,5 ot/min. Rotační pohyb zajišťoval elektromotor s možností regulace otáček a také směru otáčení. Důsledkem otáčení

válce vznikala na jeho povrchu tenká vrstva polymerního roztoku, z které se vlivem elektrostatického pole tvořilo množství Taylorových kuželů. Na protielektrodu byly ukládány v podobě vláken vypuzené proudy kapaliny. Protielektrodu představovaly navržené kolektory, které budou podrobně popsány. Vzdálenost mezi elektrodami, elektrické napětí a doba zvlákňování se měnily v závislosti na použitém polymeru. Byly použity polymerní roztoky PVA, PUR a PEOEMA.

3.3.2 Horkovzdušná komora

Zařízení firmy Memmert, model 400 má celonerezovou konstrukci s antikorozními vlastnostmi včetně komory. Vysokou teplotní homogenitu zajišťuje v celém prostoru komory výhřevný systém, který je součástí stěn. K nastavení teploty a času slouží elektronický PID regulátor s integrovaným autodiagnostickým systémem k rychlému zjištění chyby se zabudovaným časovačem. Po skončení sušícího procesu se automaticky po 30min vypíná ventilátor, který slouží pro nucený oběh proudění vzduchu. Přístroj je dále vybaven displejem, který zobrazuje požadovanou a aktuální teplotu.

3.3.3 Rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130

Základní funkcí mikroskopu je pozorování povrchů nejrůznějších objektů a získání jejich mnohonásobného zvětšeného obrazu s velkou hloubkou ostrosti. V této práci byl mikroskop použit ke zhotovení snímků výsledných vláknenných vrstev.

Kromě názvu rastrovací se používá i označení skenovací nebo řádkovací elektronový mikroskop, z čehož vyplývá, že při práci mikroskopu se primární svazek pohybuje po řádcích po preparátu a vyráží sekundární elektrony, které jsou snímány sondou, převáděny na videosignál a zobrazeny na monitoru počítače. Mikroskop je plně řízen počítačem. Doplnkový software umožňuje zaznamenávání a archivování zvětšených obrazů ve standardním obrazovém formátu na počítačová záznamová média. Uložené obrazy mohou být dále upravovány v jiných programech.

Mikroskop má několik základních částí: fyzikální část, elektronika, počítač a software. Obraz povrchu vzorku vzniká ve fyzikální části, která se skládá z tubusu, komory, vakuového systému a detektorů. V této části mikroskopu je formován a vychylován fokusovaný elektronový svazek, který dopadá na povrch zkoumaného

preparátu. Preparát se upravuje naprášením tenké vrstvy kovu (zlata, stříbra,...) o tloušťce cca 10 – 20 nm v přístroji SCD 030. Potom je umístěn v komoře mikroskopu a je polohován pomocí manipulátoru. Celý prostor zařízení je vakuován pomocí vývěv, což zabezpečuje existenci vysokého vakua nutného pro činnost mikroskopu [59, 60].

Parametry přístroje: rozlišení 3nm, zvětšení 20 – 50000, urychlovací napětí 0,2 – 30kV, dosahovaný tlak 5×10^{-3} Pa [61, 62].

3.3.4 *Obrazový analyzátor NIS Elements AR 3.0*

NIS-Elements Advanced Research je program určený pro nejširší použití v laboratořích, školách a vědeckých ústavech, využívajících při svojí činnosti moderní metody počítačové analýzy obrazu. Nabízí úplné řešení zahrnující snímání obrazu, archivaci i analýzu. Dokáže bezchybně zvládnout snímání a zobrazení vícedimenzionálních obrázků až v šesti dimenzích naráz (X, Y, Z, vlnová délka, čas, multipoint). Dále disponuje škálou přídavných nástrojů pro modifikace nasnímaných obrazů: odstraňování neostrých částí obrazu, tedy těch částí, které ležely při snímání mimo rovinu ostrosti, modul rozšíření hloubky ostrosti (EDF), obrazová databáze atd. [64].

Snímky získané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu VEGA TS 5130 byly nahrány do programu NIS Elements, kalibrovány a oříznuty. Kalibrace je parametr systému NIS Elements před měřením. Ten přiřazuje objektům jejich reálný rozměr. Dále byly měřeny průměry vláken a velikosti pórů.

3.4 **Návrh kolektorů pro elektrostatické zvlákňování**

V první části experimentu byly vyrobeny čtyři kolektory pro zvlákňování objemné vláknenné vrstvy. Dále byl sledován vliv elektrostatického pole na ukládání nanovláknenné vrstvy, vlastnosti nanovláknenné vrstvy a jestli jsou kolektory vhodné pro výrobu objemných vrstev.

3.4.1 Kolektor č. 1

Kolektor byl zhotoven z nevodivé desky a mosazných trubek. Mosazné trubky měly průměr 9 mm, vzdálenost mezi jednotlivým trubkami byla 8 mm a výška trubek byla 13 mm. Nevodivá deska byla zhotovena z odleptaného kuprexidu. Velikost desky: 16,5 x 9,5 [mm]. Kolektor č. 1 je zobrazen na Obr. 32.



Obr. 32 Kolektor z nevodivé desky a z mosazných trubek

Vodivost všech mosazných trubek zajišťoval měděný drát, který byl připájen na jednotlivé mosazné segmenty Obr. 33.



Obr. 33 Kolektor z nevodivé desky a z mosazných trubek, které jsou propojeny

3.4.2 Kolektor č. 2

Tento kolektor je kopií kolektoru č. 1. Použité mosazné trubky mají stejné parametry jako u předchozího kolektoru, proto nebudou dále popisovány. Rozdíl spočívá pouze v materiálu použité desky. Deska byla z nevyleptaného kuprexidu, tedy vodivá. Kolektor č. 2 je zobrazena na Obr. 34.



Obr. 34 Kolektor z vodivé desky a z mosazných trubek

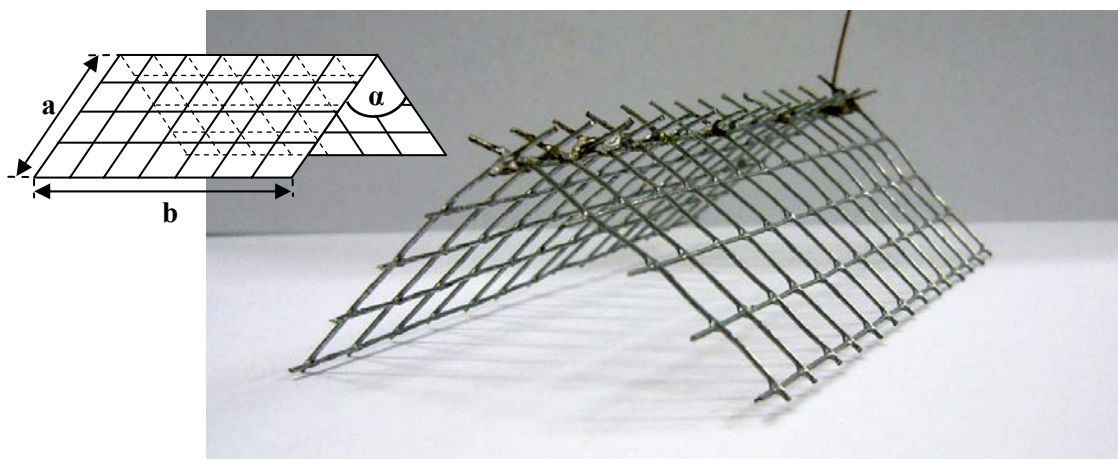
Tak jako u kolektoru č.1, vodivost všech mosazných trubek zajišťoval měděný drát, který byl připájen na jednotlivé mosazné segmenty Obr. 35.



Obr. 35 Kolektor z vodivé desky a z mosazných trubek, které jsou propojeny

3.4.3 Kolektor č. 3

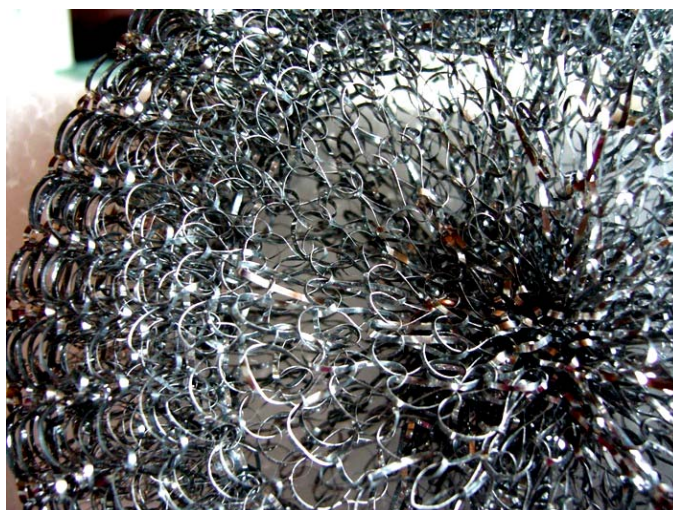
Kolektor byl zhotoven ze svařované pozinkované sítě o průměru drátu 0,8mm. Velikost oka u sítě byla 8mm. Pozinkovaná síť byla natvarována do podoby střechy. Délka kolektoru $b=130\text{mm}$, výška $a=50\text{mm}$, úhel $\alpha=90^\circ$. Kolektor č. 3 je zobrazen na Obr. 36.



Obr. 36 Náskres a foto kolektoru ze svařované pozinkované sítě

3.4.4 Kolektor č. 4

Kolektor je vyroben z kovového proplétaného drátu (drátěnka od firmy Spontex). Má kruhový tvar o průměru 120mm a výšce 25mm. Kolektor č. 4 je zobrazen na Obr. 37.



Obr. 37 Kolektor z kovového proplétaného drátu

3.5 Zvlákňování roztoků na navržené kolektory

Všechny roztoky byly zvlákňovány na laboratorních zařízeních, které jsou podrobně popsány v experimentální části této práce v kapitole 3.3.1. Princip uvedených zařízení je popsán v teoretické části diplomové práce v kapitole 2.1.2.

Zpočátku bylo elektrostaticky zvlákňováno na všechny kolektory z levnějšího polymerního roztoku PVA, aby se zjistilo, jestli lze na tyto kolektory zvlákňovat objemné vrstvy nanovláknenné textilie. Po vyhodnocení vrstev byly vybrány dva kolektory, na které se dále zvlákňováno z biokompatibilních roztoků polymerů PUR a PEOEMA, které jsou vhodné pro biomedicínské aplikace.

Bylo nutné nastavit optimální napětí a vzdálenost kolektoru od protielektrody pro následné zvlákňování roztoku na navržené kolektory. V následující Tab. 6 jsou uvedeny vzdálenosti mezi elektrodami pro všechny typy kolektorů a pro všechny použité roztoky.

Označení kolektoru	Polymer	Vzdálenost mezi elektrodami [mm]	Napětí [kV]
Kolektor č. 1	PVA	90	50
	PUR	150	60
	PEOEMA	165	38
Kolektor č. 2	PVA	90	44,5
Kolektor č. 3	PVA	90	40
	PUR	150	40
	PEOEMA	155	28
Kolektor č. 4	PVA	100	45

Tab. 6 Vzdálenost mezi elektrodami při elektrostatickém zvlákňování.

Zvlákňování z roztoku PVA probíhalo bezproblémově. U roztoku PUR a PEOEMA musela být nastavena větší vzdálenost mezi elektrodami. Při vzdálenosti elektrod cca 100 mm se tvořila málo vydloužená vlákna a rozpouštědlo se nestačilo dostatečně odpařit. Vlákna se tvořila již u válečkové elektrody, dopadala na kolektor v chomáčích a docházelo tak k vlhnutí (rozpuštění) vrstvy. Po zvětšení vzdálenosti mezi elektrodami dopadala nanovlákna na navržený kolektor stále v chomáčcích, ale k vlhnutí vrstvy už nedocházelo.

U roztoku PUR se muselo použít zvlákňovací zařízení s regulací teploty a relativní vlhkosti, protože za normálních podmínek docházelo po cca 10min k nasycení roztoku z okolního vlhkého prostředí. U roztoku začalo docházet k nárůstu viskozity a na válečku přestalo docházet k tvorbě Taylorových kuželů.

Doba zvlákňování byla u kolektorů různá. Záleželo na použitém kolektoru a polymeru. V následující tabulce je uvedena doba zvlákňování vyrobené nanovrstvy na všech typech kolektorů a také klimatické podmínky, za kterých nanovláknenná vrstva vznikala.

Označení kolektoru	Polymer	Doba zvlákňování [min]	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]
Kolektor č. 1	PVA	35	18,6	35
	PUR	140	20	14
	PEOEMA	105	20	50
Kolektor č. 2	PVA	35	18,3	38
Kolektor č. 3	PVA	35	19	39
	PUR	45	19,3	15
	PEOEMA	65	20	35
Kolektor č. 4	PVA	25	17	41

Tab. 7 Doba zvlákňování na navržené kolektory a klimatické podmínky

3.5.1 Zvlákňování z 12% roztoku PVA

3.5.1.1 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.1



Obr. 38 Nanovláknenná vrstva z 12% PVA v počátku elektrostatického zvlákňování



Obr. 39 Nanovláknenná vrstva z 12% PVA během procesu elektrostatického zvlákňování

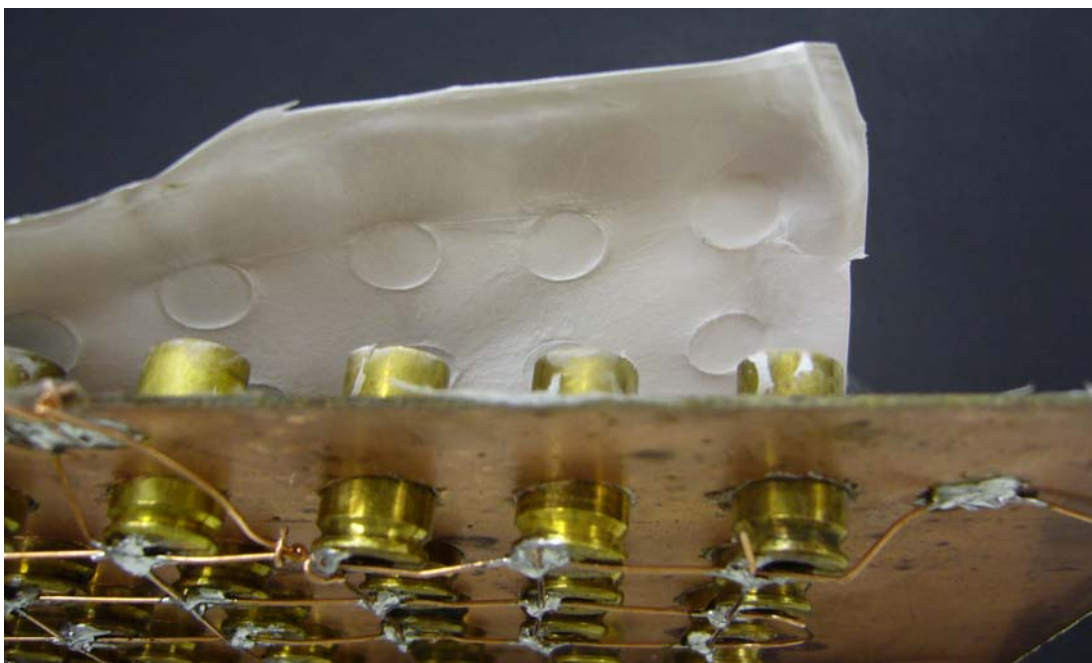


Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování

3.5.1.2 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.2

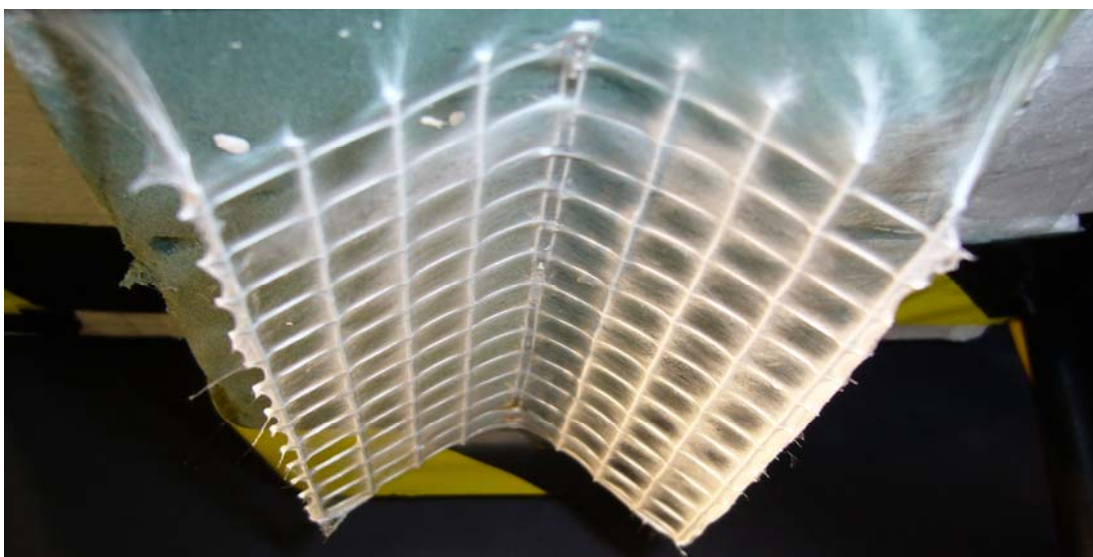


Obr. 40 Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování



Obr. 41 Částečné oddělení vrstvy z 12% PVA z navrženého kolektoru

3.5.1.3 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.3



Obr. 42 Nanovláknenná vrstva z 12% PVA v počátku elektrostatičkého zvlákňování



Obr. 43 Postupné oddělování nanovláknenné vrstvy z 12% PVA během procesu elektrostatičkého zvlákňování



Obr. 44 Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatičkého zvlákňování

3.5.1.4 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.4



Obr. 45 Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování



Obr. 46 Částečné oddělení vrstvy 12% PVA z navrženého kolektoru

3.5.2 Zvlákňování z 15% roztoku PUR

3.5.2.1 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.1

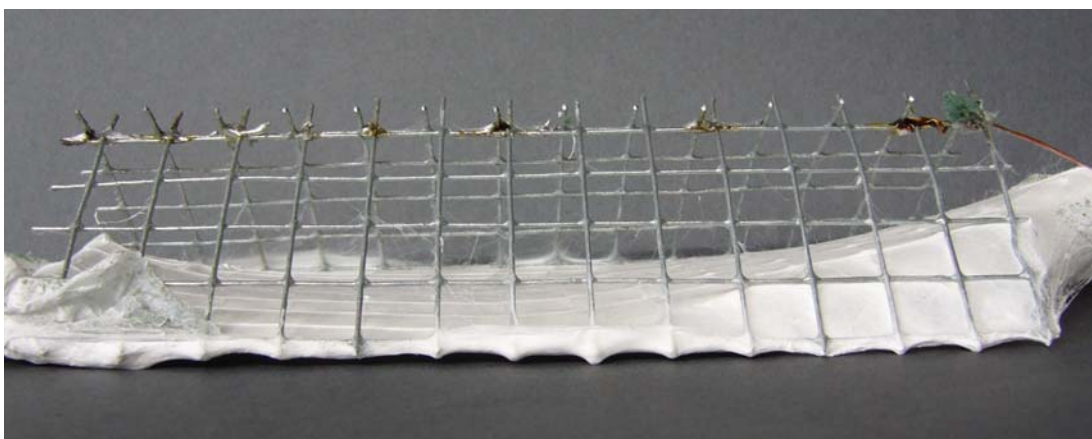


Obr. 47 Nanovláknenná vrstva z 15% PUR v počátku elektrostatického zvlákňování



Obr. 48 Oddělená nanovláknenná vrstva z 15% PUR z navrženého kolektoru

3.5.2.2 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.4



Obr. 49 Zhotovená nanovláknenná vrstva z 15% PUR na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování



Obr. 50 Oddělená nanovláknenná vrstva z 15% PUR z navrženého kolektoru

3.5.3 Zvlákňování z 10% roztoku PEOEMA

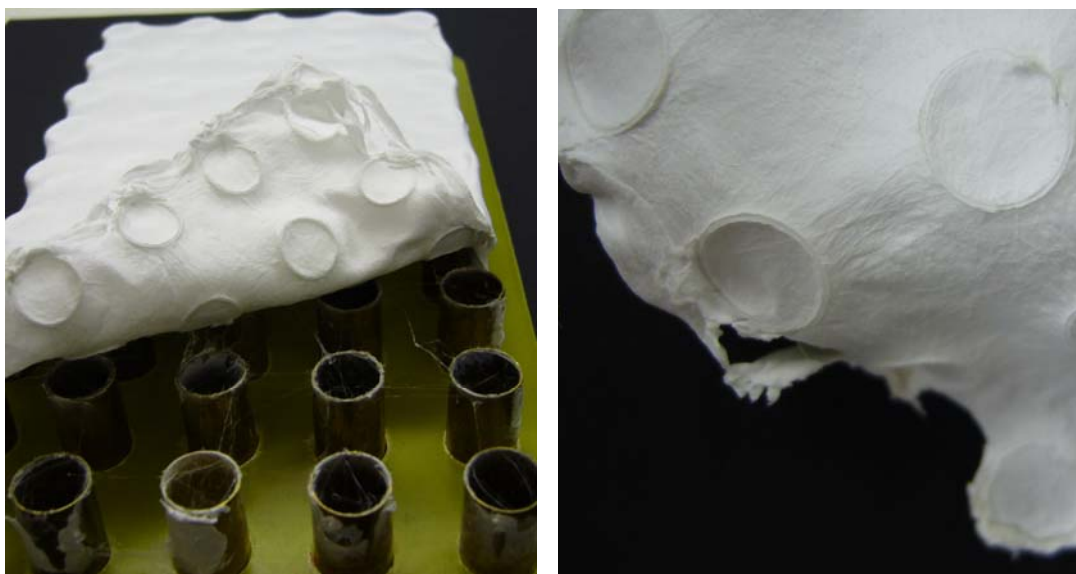
3.5.3.1 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.1



Obr. 51 Nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA v počátku elektrostatičkého zvlákňování



Obr. 52 Částečně oddělená vrstva z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru

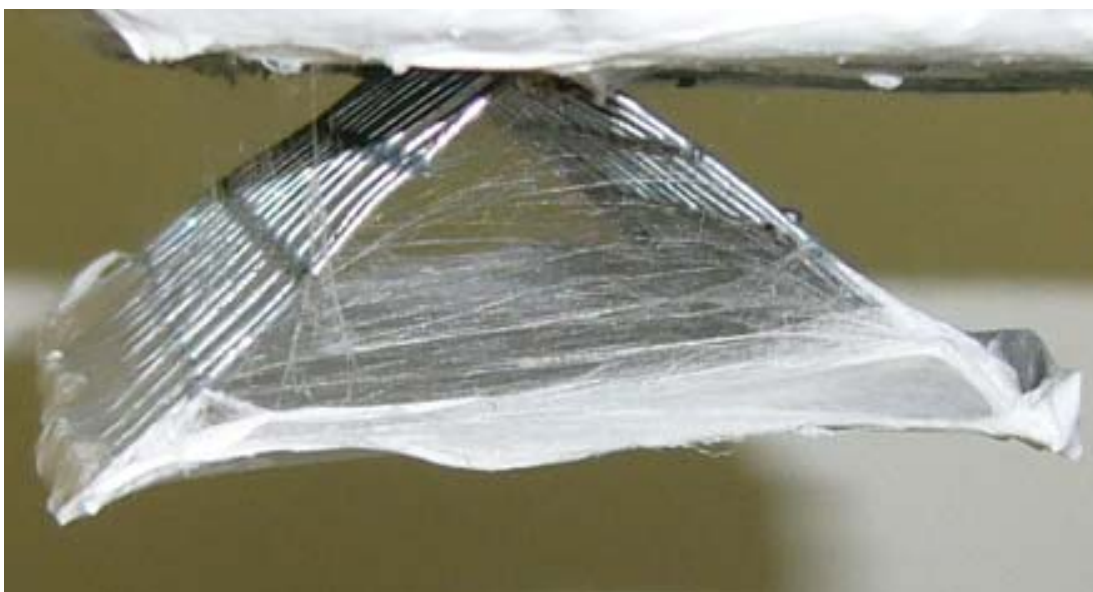


Obr. 53 Detail oddělení vrstvy z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru

3.5.3.2 Nanovláknenná vrstva na kolektoru č.4



Obr. 54 Nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA v počátku elektrostatického zvlákňování



Obr. 55 Postupné oddělování nanovláknenné vrstvy z 10% PEOEMA během procesu elektrostatického zvlákňování



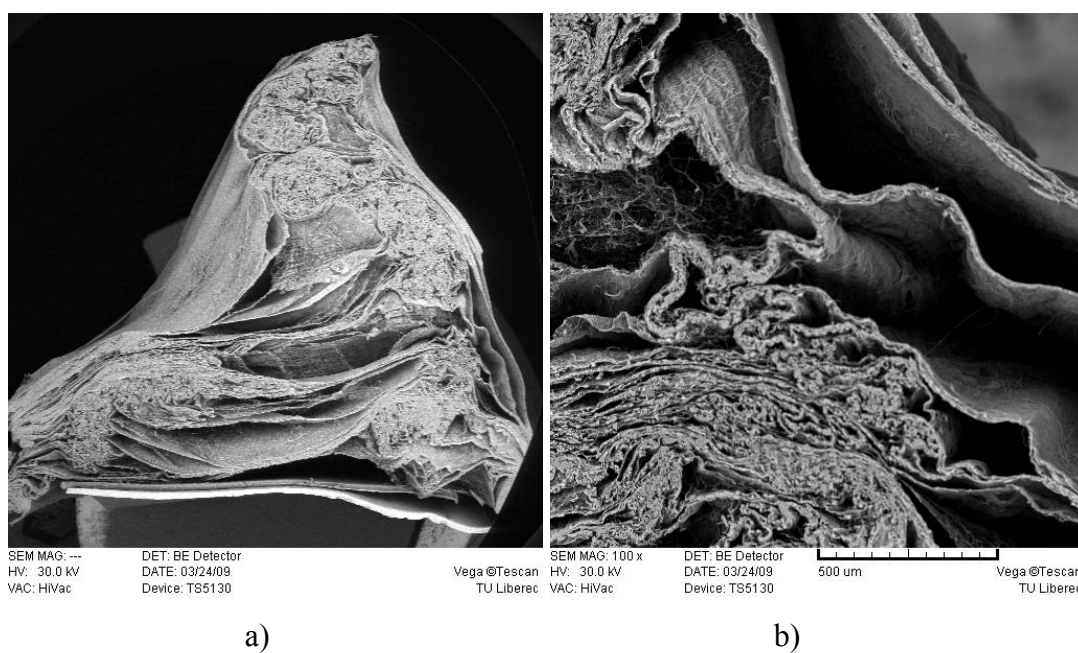
Obr. 56 Oddělená nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru

3.6 Snímky nanovláknenných vrstev z rastrovacího mikroskopu VECA TS 5130

Veškeré zhotovené snímky jsou v příloze A. Zde je uvedeno jen pár vybraných snímků.

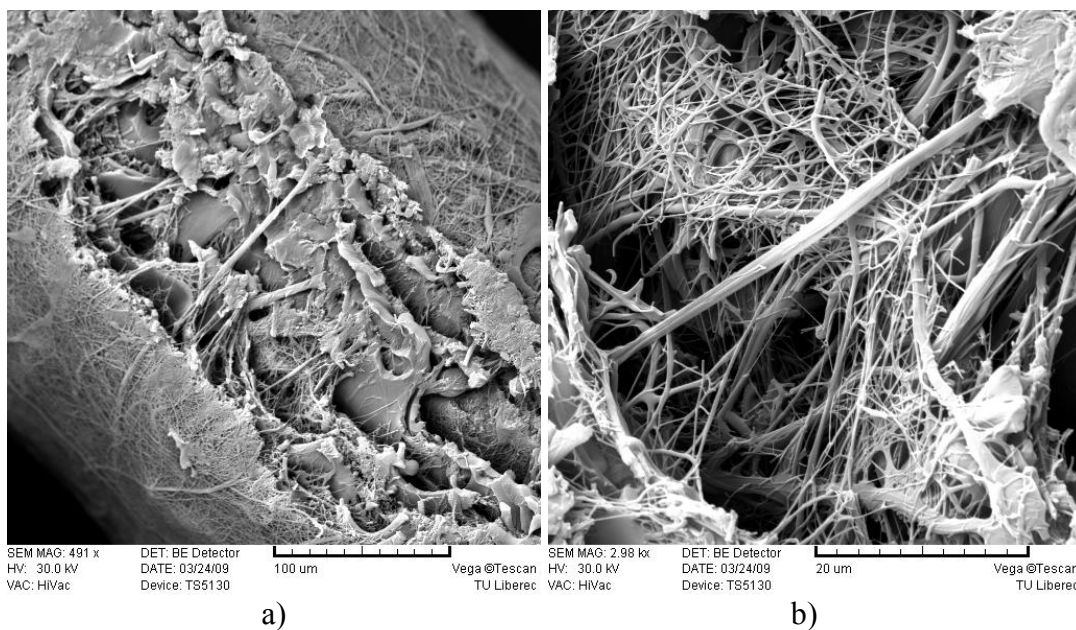
3.6.1 Snímek nanovrstvy z 12% PVA

3.6.1.1 Nanovláknenná vrstva z kolektoru č.1



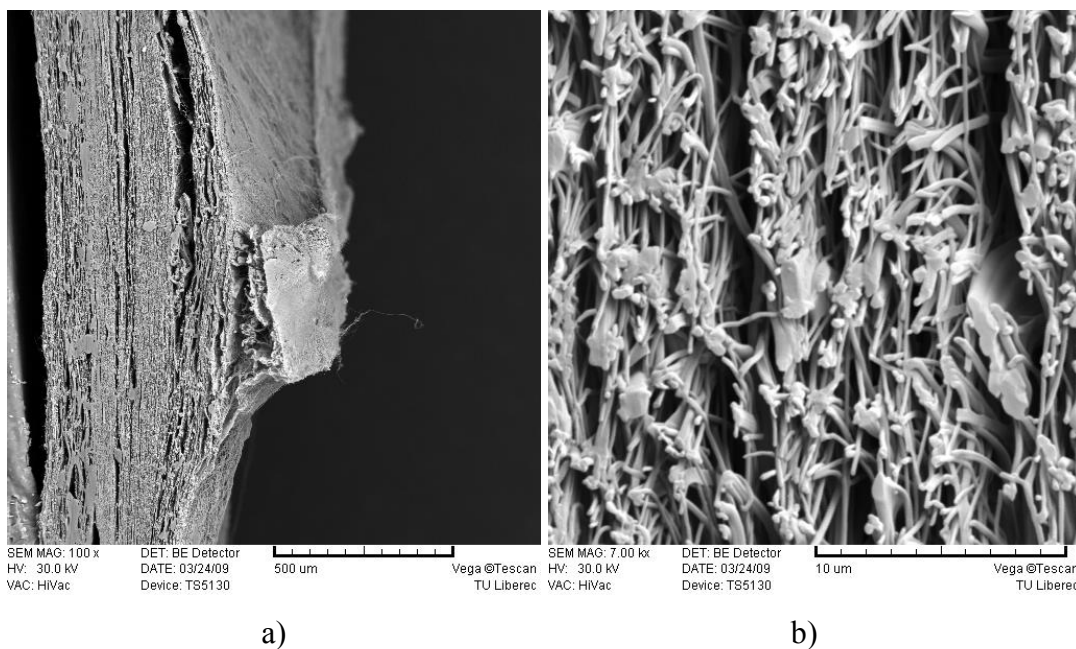
Obr. 57 Snímky řezu z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) -- b) 100x

3.6.1.2 Nanovláknenná vrstva z kolektoru č.2



Obr. 58 Snímky řezu nanovrstvy „mezi kolečky“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení:

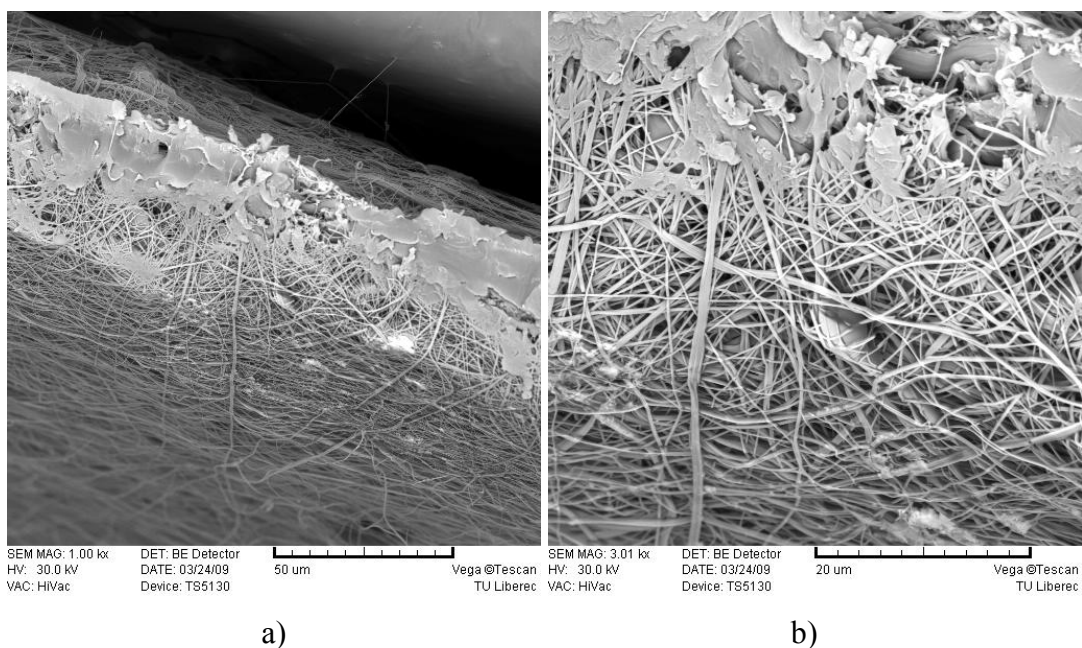
a) 500x, b) 3000x



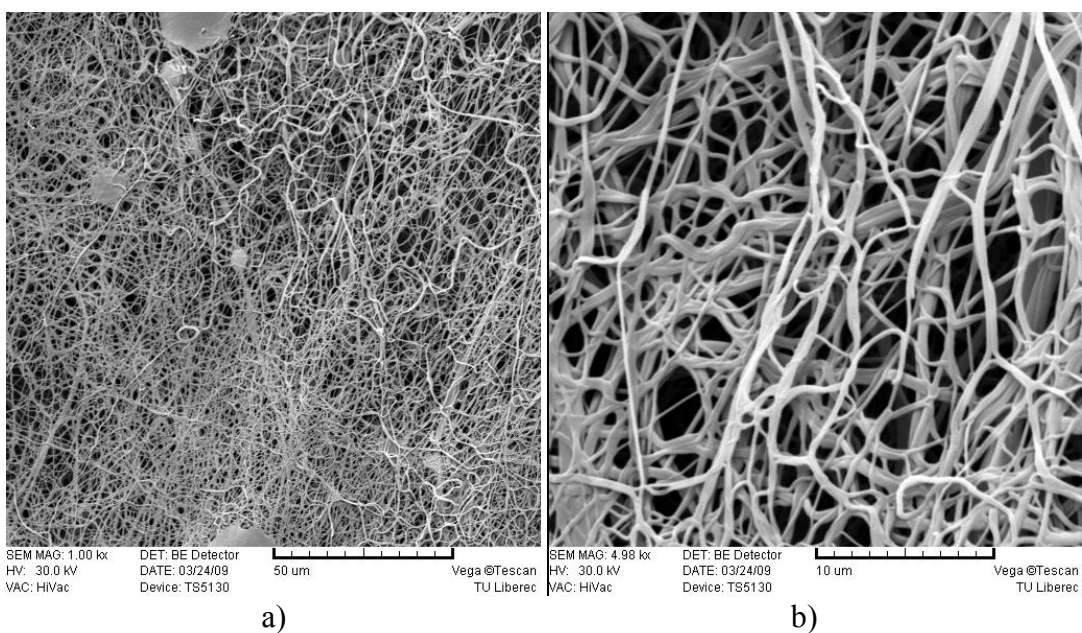
Obr. 59 Snímky řezu nanovrstvy „v kolečku“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x

b) 7000x

3.6.1.3 Nanovláknenná vrstva z kolektoru č.3

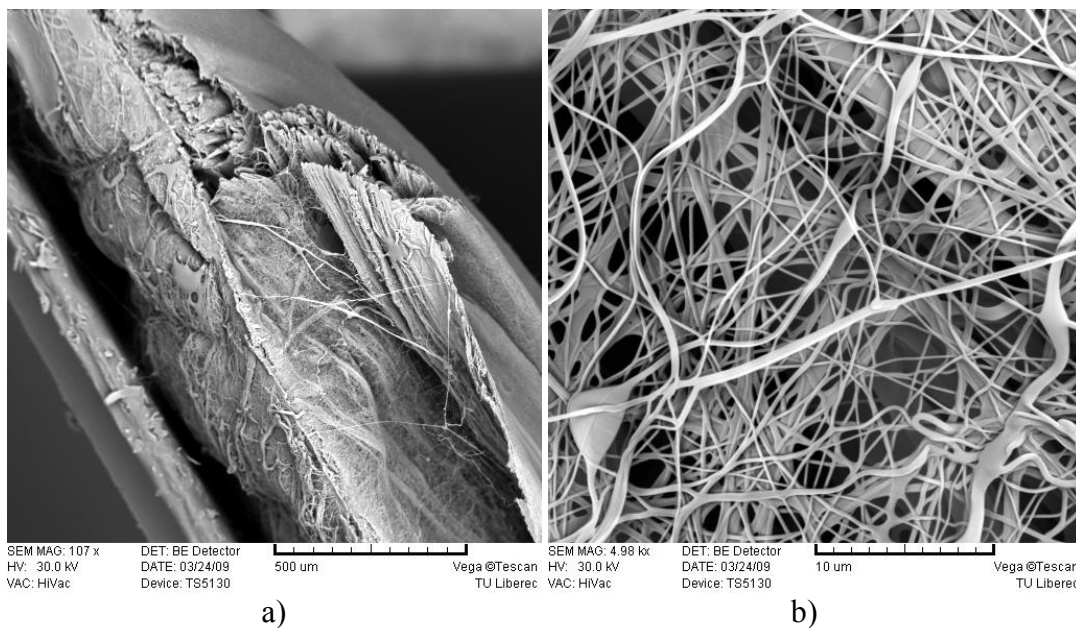


Obr. 60 Snímky řezu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 1000x b) 3000x

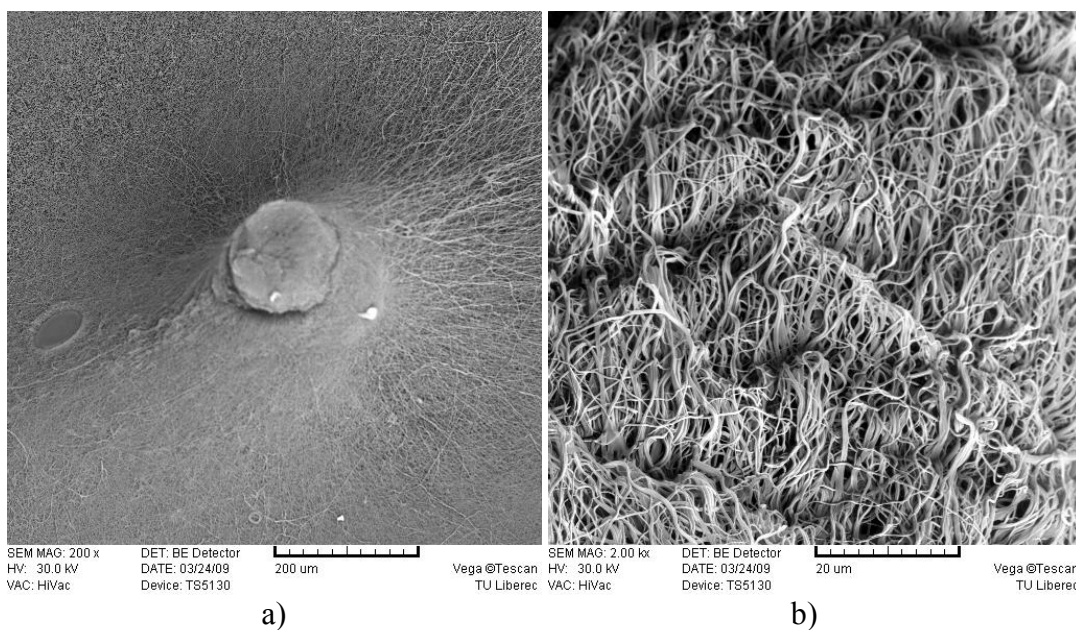


Obr. 61 Snímky povrchu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 1000x
b) 5000x

3.6.1.4 Nanovláknenná vrstva z kolektoru č.4



Obr. 62 Snímky řezu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x, b) 5000x



Obr. 63 Snímky povrchu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 200x, b) 2000x

Snímky nanovrstev z PUR a PEOEMA nebylo možno zhotovit, protože elektronový mikroskop nebyl v provozu.

3.7 Kriteria pro vyhodnocení nanovláknenných vrstev

Snímky všech nanovláknenných vrstev byly pořízené na rastrovacím elektronovém mikroskopu VEGA TS 5130. Z každé nanovláknenné vrstvy bylo zhotoveno několik snímků. Snímky byly poté zkoumány prostřednictvím obrazového analyzátoru LUCIA za účelem zjištění průměrů vláken a případně nežádoucích strukturních útvarů vyskytujících se v podobě korálových nebo kapkových defektů a vláken s průměrem vyšším než 1 μ m. Všechny snímky nanovláknenných vrstev jsou uvedeny v příloze A.

3.7.1 Průměry vláken

Průměry nanovláken byly měřeny pomocí obrazového analyzátoru NIS Elements (kap. 3.3.4) ze snímků nanovláknenných vrstev z rastrovacího mikroskopu VEGA TS 5130 (kap. 3.3.3). Z hodnot byl vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient, maximální a minimální hodnota. Pro každý vzorek byl zkonstruován histogram četností. Velikost jedné třídy byla zvolena 25nm. Histogramy, průměry nanovláken a statistické údaje jsou uvedeny v příloze B. Měření bylo provedeno u všech nanovrstev z PVA. Nanovrstvy z PUR a PEOEMA proměřovány nebyly, protože nebyla možnost získat snímky z rastrovacího mikroskopu. V Tab. 8 je uvedena průměrná tloušťka nanovláken z vrstev 12% roztoku PVA.

kolektory						
1	2		3		4	
řez vrstvy	řez vrstvy – mezi koleč.	řez vrstvy – v kolečku	řez vrstvy	povrch vrstvy	řez vrstvy	povrch vrstvy
146,1	218,48	150,95	203,45	219,94	155,83	169,46

Tab. 8 Průměrné hodnoty nanovláken ve vyrobených vrstvách 1-4 z PVA

3.7.2 Nežádoucí strukturní útvary

Za nežádoucí strukturní útvary byly považovány kapkové, korálkové defekty a jiné útvary nežádoucího tvaru a vlákna s průměrem větším než 1 μm. Příčinou těchto hrubých vláken může být slepení vícero jemných vláken. Průměr vláken i případné strukturní defekty byly zjišťovány z několika snímků zkoumaného vzorku, které jsou v příloze A. Pro důkladné měření by musely být proměřeny a vyhodnoceny větší počty snímků z různých míst nanovláknenné vrstvy.

3.7.3 Procento zaplnění

Přímo ze snímků z rastrovacího mikroskopu byly vypočteny jednotlivé plošné velikosti všech pórů. Výpočet byl proveden pomocí programu obrazové analýzy NIS Elements. Z naměřených hodnot byl dále vypočten aritmetický průměr póru, směrodatná odchylka, maximální a minimální hodnota, obvod a šířka pórů. Průměry pórů a statistické údaje jsou uvedeny v příloze C. Z celkové plochy pórů a celkové plochy snímku bylo vypočteno procentuální zaplnění nanovláknenné vrstvy vzorku. Je důležité podotknout, že se jedná o plošnou interpretaci zaplnění, nikoliv o objemovou.

Procentuální zaplnění je vypočteno podle vztahu (27).

$$Z = \frac{V}{S} * 100 \quad (27)$$

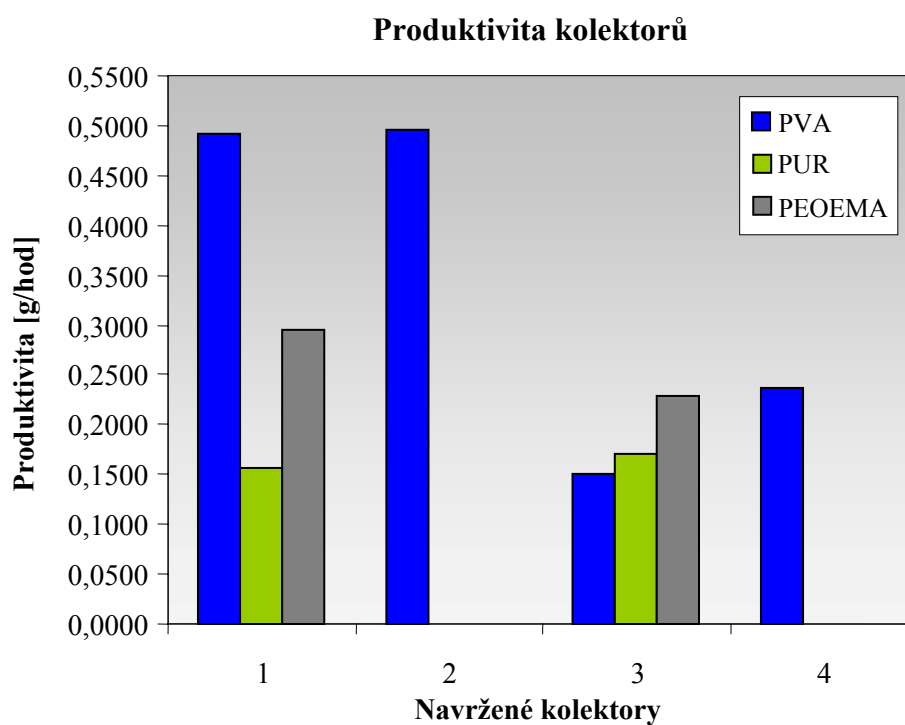
kde Z je podíl plochy v %, V je celková plocha pórů v μm² a S je celková plocha vzorku v μm².

3.7.4 Produktivita zvlákňovacího zařízení

Produktivita zvlákňovacího zařízení Q se u statického kolektoru dá vyjádřit např. v g/hod. K výpočtu produkce zařízení posloužily hodnoty hmotnosti vyrobených vzorků, které byly váženy na digitálních vahách s přesností 0,0001g. Z důvodu nedostatku materiálu byl vážen pravoúhlý vzorek o ploše 0,0016 m². Hmotnost vzorků a vypočtené hodnoty produkce zvlákňovacího zařízení jsou uvedeny v Tab. 9 a dále zpracovány v Graf. 1.

Označení kolektoru	Polymer	Hmotnost vzorku [g]	produktivita [g / hod]
Kolektor č. 1	PVA	0,2871	0,4922
	PUR	0,3672	0,1574
	PEOEMA	0,515	0,2943
Kolektor č. 2	PVA	0,2895	0,4963
Kolektor č. 3	PVA	0,0881	0,1510
	PUR	0,1275	0,1700
	PEOEMA	0,191	0,2292
Kolektor č. 4	PVA	0,099	0,2376

Tab. 9 Vypočtené hodnoty produktivity zvlákňovacího zařízení u vzorků 1 – 4



Graf. 1 Produktivita navržených kolektorů pro zvlákňování v g/hod

Z Graf. 1 je vidět, že největší výrobnost s roztokem 12% PVA má kolektor č.2 a nejmenší výrobnost kolektor označený č.3. Pro další experiment s roztoky PUR a PEOEMA byly ale vybrány kolektory s č. 1 a 3. Kolektor č.1 byl vybrán kvůli vzniklé nanovrstvě, která byla velmi pozoruhodná svým vzhledem a její výrobnost se

zas až tak nelišil od kolektoru č.2. Kolektor č.3 se jevil zajímavý samostatným oddělováním nanovrstvy. U kolektoru č. 4 nastalo po 20 minutách k poklesu zvlákňování a po 25 minutách už téměř nezvlákňoval.

Biokompatibilní roztoky PUR a PEOEMA se tedy zvlákňovali na dva vybrané kolektory. Z Graf. 1 je zřejmé, že u kolektoru č.3 produktivita těchto biokompatibilních polymerů vzrostla, ale naopak u kolektoru č. 1 produktivita klesla.

4 DISKUZE A VÝSLEDKY

Cílem této práce bylo navrhnout kolektory pro zvlákňování objemných vrstev a najít optimální podmínky zvlákňování na zařízení nanospider v poloprovozu netkaných textilií. Byl hodnocen průběh zvlákňování a výkony zařízení. Dále byly vyrobené nanovrstvy analyzovány pomocí elektronové mikroskopie a zjišťována stejnoměrnost průměrů vláken, velikost a množství mezivláknenných pórů, výskyt strukturních defektů a výrobnost kolektorů.

Elektrostatické zvlákňování na zařízení Nanospider, volba optimální vzdálenosti elektrod a napětí

Zvlákňování bylo provedeno na laboratorním zařízení Nanospider s hladkou válcovou zvlákňovací elektrodou. Byly zvlákňovány tři polymerní roztoky: 12% polyvinylalkohol, 15% polyuretan a 10% Poly(2-ethoxyethyl metakrylát) - PEOEMA. Složení roztoků je uvedeno v kap. 3.2 .

Každý polymer disponuje jinými vlastnostmi, takže se v procesu elektrostatického zvlákňování chová individuálně, jedinečně a proto pro každý nový polymer je nutné hledat ideální podmínky procesu. Na zařízení byla tedy měněna vzdálenost válcové elektrody a kolektoru a přiváděné napětí.

Napřed se zvlákňoval na všechny kolektory roztok 12% PVA. Tento polymer je nejlevnější z polymerů použitých v experimentu. Jeho použitím se zjišťovalo, jestli jde na navržených kolektorech vyrobit objemná nanovrstva s požadovanými rozměry vláken a bez výraznějších defektů. Vybraly se dva kolektory. Jeden byl pozoruhodný strukturou vyrobené nanovrstvy a druhý postupným samovolným oddělováním nanovláknenné vrstvy od kolektoru. Na tyto dva vybrané kolektory se zvlákňovaly zbývající dva roztoky.

Vliv teploty a vlhkosti na elektrostatické zvlákňování na zařízení Nanospider

Roztok PVA i PEOEMA na malém laboratorním zařízení při zvlákňování nedělal žádné potíže. Problém byl s roztokem PUR, který při teplotě a vlhkosti vyskytující se v laboratoři přestal po cca. 10 min zvlákňovat. Roztok se stal velice viskózním a přestaly se tvořit Taylorovi kužely. Vyřešilo se to klimatizační jednotkou, která snížila okolní vlhkost (0, kap. 3.5) při zvlákňování.

Vyhodnocení vyrobených vrstev

Vyhodnocovaly se jen vrstvy z roztoku PVA, protože z vrstev PUR a PEOEMA nebylo možné udělat snímky. Elektronový mikroskop na TUL nebyl v provozu.

Nejmenší hodnota průměrného průměru nanovláken 146 [nm] byla naměřena u vrstvy vyrobené na kolektoru č.1 . Největší hodnota průměrného průměru vláken 219, 94 [nm] měla vrstva vyrobená na kolektoru č. 3. Tato hodnota byla naměřena ze snímku pořízeného z povrchu zkoumané vrstvy.

Nejstejněmější byly průměry vláken vyrobené na kolektoru č. 4, hodnota variačního koeficientu byla 27 [%]. Téměř stejnou hodnotu variačního koeficientu průměrů nanovláken 28 [%] měla vrstva vyrobená na kolektoru č.2 . Nejmenší stejnoměrnost průměrů vláken měla vrstva vyrobená na kolektoru č. 3, variační koeficient je 62 [%].

Nejvyšší hodnota procenta zaplnění 79 [%] byla u vrstvy vyrobené na kolektoru č. 1. Nejnižší procento zaplnění 72 [%] bylo naměřeno u vrstvy vyrobené na kolektoru č. 2 v řezu a u vrstvy č. 3 na jejím povrchu.

Vyhodnocení produktivity kolektorů

U roztoku 12% PVA má největší výrobnost 0,496 g/hod kolektor č.2 a nejmenší výrobnost 0,151 g/hod kolektor č.3. Biokompatibilní roztoky PUR a PEOEMA se zvlákňovali už jen na dva vybrané kolektory. Z Graf. 1 (kap. 3.7.4) je zřejmé, že u kolektoru č.3 produktivita těchto biokompatibilních polymerů oproti roztoku PVA vzrostla, ale naopak u kolektoru č. 1 produktivita klesla. U roztoku PUR byla větší produktivita 0,170 g/hod u kolektoru č. 3. U roztoku PEOEMA byla větší produktivita 0,294 g/hod u kolektoru č. 1.

Nevláknové útvary

Na snímcích rastrovacího mikroskopu lze pozorovat, že některé zvlákněné vrstvy neobsahují jen nanovlákná, ale v menší míře i různé defekty, nežádoucí útvary různých velikostí a tvarů.

5 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na výrobu kolektorů pro výrobu objemných nanovláknenných vrstev. V první části práce byl zkoumán vliv elektrostatického pole na ukládání výsledné nanovláknenné vrstvy. Pro samotný proces elektrostatického zvlákňování byla důležitá hlavně vzdálenost mezi elektrodami a přiváděné napětí. Jak bylo uvedeno v teoretické části této práce, geometrické charakteristiky nanovláknenných vrstev a jejich plošnou hmotnost výrazně ovlivňují parametry procesu a roztoků. Z tohoto důvodu byla oblast zájmu soustředěna na zjišťování optimálních parametrů, které ovlivňují proces elektrostatického zvlákňování v případě použití různých elektrod. Pod pojmem optimální parametry rozumějme takové parametry, při kterých budou vytvářeny kvalitní nanovláknenné vrstvy s co nejjemnějšími vlákny a nízkým nebo žádným výskytem nežádoucích strukturních útvarů. Procesní parametry se z tohoto důvodu lišily pro každý navržený kolektor. Z experimentu je zřejmé, že materiál použitý na výrobu kolektoru ovlivňuje ukládání vláken na jeho povrch. Jiná vrstva vznikala na kolektoru č. 1 a kolektoru č. 2., které se lišily jen v nosné desce kolektoru. Zajímavý se jevil kolektor č. 3, kde docházelo k samovolnému postupnému oddělování nanovrstvy od kolektoru. Nemusel se tedy řešit často se vyskytující problém, jak oddělit vrstvu nanovláken od kolektoru tak, aby se nepoškodila. Zvlákňování roztoků probíhalo bezproblémově. Pouze u kolektoru č. 4 měla výsledná vrstva velmi neuspokojivé vlastnosti co se týče tloušťky a krátké doby zvlákňování.

Z výsledků získaných v této práci lze konstatovat, že navržené kolektory jsou vhodné pro výrobu objemných nanovláknenných vrstev. Vytvořené vrstvy byly ucházející s dobrou hustotou vláken. Avšak, jestli jsou kolektory vhodné pro zvlákňování biomedicínských vrstev nelze s jistotou říci. Vláknenné vrstvy z biokompatibilních polymerů na kolektorech jdou zvláknit velice dobře, ale nebylo možno z nich udělat snímky na rastrovacím mikroskopu VEGA TS 5130 a prostudovat tak průměry vláken, pórů a zaplnění.

Na některých snímcích řezu nanovláknenné objemné vrstvy lze vidět, že řezy nebyly zcela kvalitní, nebylo tedy možné prozkoumat vlákna uvnitř nanovrstvy. Byl zkoušen i způsob zalití vláknenné vrstvy do pryskyřice a provedení řezu teprve po jejím zatvrdnutí. Ukázalo se, že tento způsob nelze uplatnit, protože došlo

k rozpuštění vláken. Byly tedy zhotoveny alespoň snímky z povrchu vrstvy. V případné navazující práci je třeba navrhnout jiný způsob řezu vrstvou.

Seznam použité literatury

- [1] Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*, Composites science and technology , Volume 63, Issue 15, November 2003, Pages 2223-2253
- [2] Chronakis, I. S. *Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process*, Journal of Materials Processing Technology, 2005 vol.167(no.2/3)
- [3] Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G. and Brenner, M., *Electrospinning and electrically forced jets. I. stability theory*, American Institute of Physics, pp. 2201-2220, 2001
- [4] Yarin, A. L., Koombhongse, S., Reneker, D. H. *Bending instability in electrospinning of nanofibers*, Journal of Applied Physics, pp. 3018-3026, 2001
- [5] Krishnappa, R. V. N., Desai, K. and Sung, C. *Morphological study of electrospun polycarbonates as a function of the solvent and processing voltage*, Journal of Materials Science, Springer Netherlands, ISSN 0022-2461 (Print) 1573-4803, Volume 38, Number 11 / June, 2003
- [6] Tan S H, Inai R, Kotaki M and Ramakrishna S *Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process*, 2005, Dostupné z WWW:
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXW-4GFNG6N-2&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=efad27a773837d5fc44db11e6b874f6
- [7] Desai, K., Lee, J. S. and Sung, C. *Nanocharacterization of electrospun nanofibers of polyaniline/poly methyl methacrylate blends using SEM, TEM and AFM* , Microscopy and Microanalysis, August 1–5, 2004.
- [8] Van Royen, P., Schacht, E., Ruys, L. and Van Vaeck, L. *Static secondary ion mass spectrometry for nanoscale analysis: surface characterisation of electrospun nanofibres*, Rapid communications in mass spectrometry , ISSN 0951-4198, pp. 346-352, 2006
- [9] Shawon, J. and Sung, C. *Microstructures of electrospun polycarbonate fibers with solvent mixture THF and DMF by SEM/TEM*, Microscopy and Microanalysis, August 4–8, 2002
- [10] Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W., Lim, T., Ma, Z. *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, New Jersey, World Scientific, 2005, ISBN 981-256-454-3

- [11] Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. *Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering*, Biomaterials, Volume 25, Issue 5, February 2004, Pages 877-886
- [12] Li, D., Wang, Y. and Xia, Y. *Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays*, Nano Letters, 3 (8), pp 1167–1171, 2003, Dostupné z WWW:
<<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl0344256>>
- [13] Teo, W.E. and Ramakrishna, S. *Electrospun fibre bundle made of aligned nanofibres over two fixed points*, Nanotechnology, Volume 16, Issue 9, pp. 1878-1884, 2005
- [14] Megelski, S., Stephens, J.S., Chase, D. B. and Rabolt, J. F. *Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibres*, Macromolecules. 35, pp. 8456-8466, 1999
- [15] Zhao, S. L., Wu, X. H., Wang, L. G. and Huang, Y. *Structure and process relationship of Electrospun bioabsorbable nanofiber membranes*. Polymer. 43, pp. 4403-4412, 2004
- [16] Myung-Seob Khil, Dong-II Cha, Hak-Yong Kim, In-Shilk Kim, Narayan Bhattarai, 2002, *Electrospun Nanofibrous Polyurethane Membrane as Wound Dressing*, Department of Advanced Organic Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, South Korea
- [17] Shummer, P. and Tebel, K. H. *A new elongation rheometer for polymer solutions*, J. Non-Newton. Fluid. 12, 331-347, 1983
- [18] Prego, M., Cabeza, O., Carballo, E., Pranjo, C. F. and Jimenez *Measurement and interpretation of the electrical conductivity of 1-alcohols from 273 K to 333K*, J. Mol. Liq. 89, pp. 233-238, 2000
- [19] Theron, S. A. , Zussman, E. Yarin A. L. *Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions*, Polymer, 45, pp. 2017-2030, 2004
- [20] Buchko, C. J, Chen, L. C., Shen, Y. and Martin, D. C. *Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films*, Polymer 40, pp. 7397-7407, 1999
- [21] Mit-uppatham, C. Nithitanakul, M. and Supaphol *Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers, Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter*, Macromol. Chem. Physic. 205, pp. 2327-2338, 2004
- [22] Demir, M. M. Yilgor, E. and Erman, *Electrospinning of polyurethane fibers*, Polymer. 43, pp. 3303-3309, 2002

- [23] Mleziva, J., Šňupárek, J. Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití, 2. přepracování, vydavatelství Praha: Sobotáles, ISBN 8085920727, 2000
- [24] *Polyuretanová vlákna*, (20. 5. 2009), Dostupné na WWW:
[<www.oblezeni.cz/clanky/polyuretanova-vlakna.php>](http://www.oblezeni.cz/clanky/polyuretanova-vlakna.php)
- [25] Koski, A., Yim, K., Shivkumar S. *Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning*, Materials Letters Volume 58, Issues 3-4, January 2004, Pages 493-497
- [26] Son, W.K. , Youk, J.H. et al. Materials Letters. Vol. 59, Issue 12: *Effect of pH on electrospinning of poly(vinylalkohol)*. Daejeon, South Korea: May 2005, p. 1571-1575.
- [27] Jirsák, O., Kalinová, K. *Netkané textilie*, TU v Liberci, Liberec 2003.
- [28] Růžicková, J. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. Liberec: TU v Liberci, 2006. 54 s. ISBN 80-7372-066-3
- [29] Chemical Engineering Department at Virginia Polytechnic Institute and State University, Electrospinning, Dostupné z WWW:
[<http://www.che.vt.edu/Wilkes/electrospinning/electrospinning.html>](http://www.che.vt.edu/Wilkes/electrospinning/electrospinning.html)
- [30] Textilní nanomateriály TUL, návod na cvičení, (10.1.2009), Dostupné z WWW:
[<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/N%C3%A1vod%20na%204.cvi%C4%8Den%C3%AD_TNA%20.pdf>](http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/N%C3%A1vod%20na%204.cvi%C4%8Den%C3%AD_TNA%20.pdf)
- [31] Mosinger, J., Jirsák, O., Kubát, P., Lang, K., Mosinger, B. Jr, *Bactericidal nanofabrics based on photoproduction of singlet oxygen*, (10.1.2009), Dostupné z WWW:
[<http://www.rsc.org/suppdata/JM/b6/b614617a/b614617a.pdf>](http://www.rsc.org/suppdata/JM/b6/b614617a/b614617a.pdf)
- [32] Manuel, J. Diaz-de Leon *Electrospinning nanofibres of polyaniline and polyaniline/ (polystyrene and polyethylene oxide) blends*, University of Kentucky, (14. 01.2009), 2001 Dostupné z WWW:
[<http://www1.uprh.edu/npinto/papers/1ncur2001.PDF>](http://www1.uprh.edu/npinto/papers/1ncur2001.PDF)
- [33] Chaloupek, J. *Smáčení vláknenných útvarů*, Disertační práce, Liberec: TU v Liberci, 2008
- [34] PirkI, S. *Metody měření reologických vlastností kapalin*, Ústav aplikované fyziky a matematiky, Univerzita Pardubice, (12.04.2009), Dostupné z WWW:
[<http://kf.upce.cz>](http://kf.upce.cz)
- [35] Mleziva, J., Kálal, J. *Základy makromolekulární chemie*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986.

- [36] Ducháček, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [37] Milada Krebsová, 1979, *Nauka o polymerech*, Liberec, TUL
- [38] Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Hirvonen J. K., Beck, T. N. C. *Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers*, Polymer 42, pp. 8163–8170, 2001
- [39] Graham, K, Schreuder-Gibson, H and Gibson, M. *Incorporation of Electrospun nanofibers in to Functional Structures*, US Army Soldiers Systems Center, Natick, Massachusetts, Dostupné z WWW: http://www.inda.org/subscrip/inj04_2/p21-27-graham.pdf. >
- [40] WAGNER, J., KOPAL, A. *Fyzika II*. 2. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1995, ISBN 80-7083-118-9
- [41] Hofmann, J., Urbanová, M. *Fyzika I*, Verze 1.0. VŠCHT v Praze, 2005, Dostupné z WWW: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/>
- [42] Feynman, R., P.: *Feynmanovy přednášky z fyziky*, díl 2. Havlíčkův Brod : Fragment, 2002, ISBN 80-7200-420-4
- [43] Finch, C.A. *Polyvinyl Alcohol, Properties and Applications*, 1973 Wiley, New York
- [44] Dombrow, B. A., Stoy, A. *Polyuretany*, 1. vyd., Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1961
- [45] *Tkaňové inženýrství a regenerační medicína*, (20. 5. 2009), Dostupné z WWW: http://www.ceskaclava.cz/files/Zpravodaj_3_Veda_media_06-2007.pdf>
- [46] Grafe, T., Graham, K., Presented at INTC *Polymeric nanofibers and nanofiber webs*, A New class of Nonwoven, International Technical Conference Atlanta, Georgia, 2002
- [47] Pechová, N. *Sítování polyvinylalkoholových nanovláken*. Liberec, 2004. 75 s. Diplomová práce na textilní fakultě Technické univerzity v Liberci katedra NT, vedoucí diplomové práce Ing. Lenka Martinová, Csc.
- [48] *kyselina fosforečná*, 08. 02. 2009, Dostupné z WWW: <http://biologie.upol.cz/metody/Slovník/Fosfat.htm>>
- [49] Wikipedie, otevřená encyklopedie: *Kyselina fosforečná*, (08. 02. 2009), Dostupné z WWW: cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_fosfore%C4%8Dn%C3%A1>

- [50] Svoboda, J. *Organická chemie I*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2005. ISBN 80-7080-561-7
- [51] Wikipedie, otevřená encyklopedie: *Glyoxal*, (08. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glyoxal.svg>>
- [52] Wikipedie, otevřená encyklopedie: *Glyoxal*, (08. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Glyoxal>>
- [53] Safety data sheat LARITHANE LS 1086, Milín 2001, version 1, Firma Novotex
- [54] Safety data for tetraethylammonium bromide, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<http://msds.chem.ox.ac.uk/TE/tetraethylammonium_bromide.html>
- [55] Environmental Health Perspectives Supplements Volume 105, Number S1, February 1997, *N,N-Dimethylformamide*, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://www.ehponline.org/members/1997/Suppl-1/dfa122.html>>
- [56] Kemcolour International, *tetraethylammonium bromide*, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://www.kemcolour.com/Tetra-Ethyl-Ammonium-Bromide.htm>>
- [57] Wikipedie otevřená encyklopedie, *Aceton*, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Aceton>>
- [58] Wikipedie otevřená encyklopedie, *Ethanol*, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ethanol>>
- [59] Nebesářová, J. *Elektronová mikroskopie pro biology* 2001, (05. 03. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>>
- [60] Borovec, Z. *Elektronová mikroskopie a elektronová difrakce* 1. vyd. Praha: Univerzita Karlova, 1985
- [61] CAMSCAN VEGA TS 5130, (05. 03. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://www.camscan.com/Vega.htm>>
- [62] Rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130: Technický popis a návod k obsluze. Brno: TESCAN.
- [63] Firma Novotex, Itálie, (18. 02. 2009), Dostupné z WWW:
<http://www.novotex.it/eng/hp_eng.php>

- [64] NIS-Elements Advanced Research (05. 03. 2009), Dostupné z WWW:
<<http://www.nis-elements.com/ar.html>>
- [65] Bimax Chemicals Ltd., *2-Ethoxyethyl methacrylate*, (20. 5. 2009),
Dostupné z WWW:
<<http://www.bimax.com/eoema.htm>>
- [66] Reiter, J., Michálek, J., Vondrák, J., Chmelíková, D., Přádný, M.,
Poly(ethylmethacrylate) and poly(2-ethoxyethylmethacrylate) based polymer
gel electrolytes for lithium-ion batteries, 2005, (29. 5. 2009), Dostupné z
WWW:
<<http://147.229.68.79/www.aba-brno.cz/aba2005-html/article/pdf/45.pdf>>
- [67] Popis vynálezu k autorskému osvědčení, (27. 5. 2009), Úřad pro vynálezy a
objevy, 1989, PV 6341-85, 256437, Dostupné z WWW:
<http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/256/256437.pdf>
- [68] Přádný, M., Martinová, I., Michálek, J., Fenclová, T., Krumbholcová, E.,
*Electrospinning of the hydrophilic poly(2-hydroxyethyl methacrylate) and its
copolymers with 2-ethoxyethyl methacrylate*, Central European Journal of
Chemistry, CEJC 2007 1–13
- [69] Masopust, J.: *Patobiochemie buňky: Cytosol. Extracelulární matrix*, Praha:
Univerzita Karlova v Praze, 2003. (29. 2. 2009), Dostupné z WWW:
<http://www.zdravcentra.cz/cps/rde/xchg/zc/xsl/3141_1409.html>
- [70] Lanza R. P., Langer R., Vacanti J.: *Principles of Tissue Engineering*, Second
Edition, San Diego, Academic Press, 2000, ISBN: 0-12-436630-9
- [71] National Center For Environmental Research, *Splet' nanovláken v porovnání
s lidským vlasem*, (05. 4. 2009), Dostupné z WWW:
<http://images.google.cz/imgres?imgurl=http://es.epa.gov/ncer/events/news/2002/09_05_02b.jpg&imgrefurl=http://es.epa.gov/ncer/events/news/2002/09_05_02a.html&usq=_GtbQPZ7eg1532kWEi-REA7xKTQ=&h=1038&w=1418&sz=365&hl=cs&start=66&um=1&tbnid=nI8SfoKMFZcY6M:&tbnh=110&tbnw=150&prev=/images%3Fq%3Dnanofiber%26ndsp%3D18%26hl%3Dcs%26lr%3D%26sa%3DN%26start%3D54%26um%3D1>
- [72] Textilní nanomateriály TUL, návod na cvičení., (07. 10. 2008),
Dostupný z WWW:
<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/N%C3%A1vod%20na%204.cvi%C4%8Den%C3%AD_TNA%20.pdf>
- [73] Tissue Engineering, (16. 11. 2008), Dostupné z WWW:
<http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/background.html#background_2>

Seznam obrázků

Obr. 1	a) polopropustná nanovláknenná membrána z PU b) náplast Tegaderm (200x) [16].....	16
Obr. 2	Ektrostaticky zvlákněná vlákna plochého tvaru z roztoku PVA [25].....	17
Obr. 3	Různé tvary získaných nanovláken , formace ploché pásy během procesu elektrostatickéhozvláknování polyetylen tereftalátu 13 hmotnostních % roztoku v 1:1 dichlorometanu a kyseliny trifluoroctové. [1]	17
Obr. 4	Rotující válcový kolektor s nožovými elektrodami ve spod [13]	18
Obr. 5	Taylorův kužel [25].....	20
Obr. 6	Schématické znázornění procesu [29].....	21
Obr. 7	Schématické znázornění procesu a vznik Taylorova kuželu [72].....	21
Obr. 8	Schématické znázornění principu zařízení Nanospider a vznik nanovláken [31]	22
Obr. 9	Rychlostní profil toku v proudící kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se vrstvou kapaliny [33]	25
Obr. 10	Toková a viskózní křivka newtonské kapaliny [33].....	26
Obr. 11	Průběh tokových křive nenewtonských kapalin: 1- newtonská kapalina, 2- strukturně viskózní kapalina, 3- dilatantní kapalina, 4- pravá pseudoplastická kapalina (s mezí toku), 5- binghamská kapalina [33]	27
Obr. 12	Nanovláknena kaprolaktanu A) Koncentrace 0,1 g/ml B) Koncentrace 0,12 g/ml. [10]	29
Obr. 13	Polyamid 6.6: Vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem a) 2 cm b) 0, 5 cm. [20].....	31
Obr. 14	Spleť nanovláken v porovnání s lidským vlasem [71]	32
Obr. 15	Výsledná intenzita pole, které je tvořeno dvěma náboji.....	35
Obr. 16	Geometrické znázornění pole bodového náboje [41]	37
Obr. 17	Mřížka paralelních drátků – Ekvipontenciální plochy [42].....	39
Obr. 18	Pokles pole.....	40
Obr. 19	Stavební jednotka PVA	41
Obr. 20	Schéma přechodu vinylalkoholu na acetaldehyd [36].....	42
Obr. 21	Vzorec alkalické reesterifikace v metanolu [43]	42

Obr. 22	Struktura 2- ethoxyethylen methakrylatu [65].....	44
Obr. 23	Kultivace buněk [73]	46
Obr. 24	Lidská krevní buňka ve spleti nanovláken. [46].....	47
Obr. 25	Vzorec kyseliny fosforečné [48].....	49
Obr. 26	Vzorec glyoxalu [51]	50
Obr. 27	Vzorec TEAB [56]	51
Obr. 28	Vzorec DMF [55]	52
Obr. 29	Vzorec acetonu [57].....	52
Obr. 30	Vzorec ethanolu [58]	53
Obr. 31	Laboratorní zařízení "Nanospider"	54
Obr. 32	Kolektor z nevodivé desky a z mosazných trubek	57
Obr. 33	Kolektor z nevodivé desky a z mosazných trubek, které jsou propojeny	57
Obr. 34	Kolektor z vodivé desky a z mosazných trubek	58
Obr. 35	Kolektor z vodivé desky a z mosazných trubek, které jsou propojeny	58
Obr. 36	Nákres a foto kolektoru ze svařované pozinkované sítě.....	59
Obr. 37	Kolektor z kovového proplétaného drátu	59
Obr. 38	Nanovláknenná vrstva z 12% PVA v počátku elektrostatického zvlákňování.....	62
Obr. 39	Nanovláknenná vrstva z 12% PVA během procesu elektrostatického zvlákňování.....	62
Obr. 40	Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování.....	64
Obr. 41	Částečné oddělení vrstvy z 12% PVA z navrženého kolektoru	64
Obr. 42	Nanovláknenná vrstva z 12% PVA v počátku elektrostatického zvlákňování.....	65
Obr. 43	Postupné oddělování nanovláknenné vrstvy z 12% PVA během procesu elektrostatického zvlákňování	65
Obr. 44	Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování.....	65
Obr. 45	Zhotovená nanovláknenná vrstva z 12% PVA na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování.....	66
Obr. 46	Částečné oddělení vrstvy 12% PVA z navrženého kolektoru	66

Obr. 47	Nanovláknenná vrstva z 15% PUR v počátku elektrostatického zvlákňování.....	67
Obr. 48	Oddělená nanovláknenná vrstva z 15% PUR z navrženého kolektoru	67
Obr. 49	Zhotovená nanovláknenná vrstva z 15% PUR na navrženém kolektoru za pomoci metody elektrostatického zvlákňování.....	68
Obr. 50	Oddělená nanovláknenná vrstva z 15% PUR z navrženého kolektoru	68
Obr. 51	Nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA v počátku elektrostatického zvlákňování.....	69
Obr. 52	Částečné oddělená vrstva z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru	69
Obr. 53	Detail oddělení vrstvy z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru.....	70
Obr. 54	Nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA v počátku elektrostatického zvlákňování.....	71
Obr. 55	Postupné oddělování nanovláknenné vrstvy z 10% PEOEMA během procesu elektrostatického zvlákňování.....	71
Obr. 56	Oddělená nanovláknenná vrstva z 10% PEOEMA z navrženého kolektoru.....	72
Obr. 57	Snímky řezu z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) -- b) 100x	73
Obr. 58	Snímky řezu nanovrstvy „mezi kolečky“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 500x, b) 3000x	74
Obr. 59	Snímky řezu nanovrstvy „v kolečku“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x b) 7000x	74
Obr. 60	Snímky řezu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 1000x b) 3000x.....	75
Obr. 61	Snímky povrchu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 1000x b) 5000x.....	75
Obr. 62	Snímky řezu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x, b) 5000x.....	76
Obr. 63	Snímky povrchu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 200x, b) 2000x.....	76

Seznam tabulek

Tab. 1	Parametry ovlivňující elektrospinning	24
Tab. 2	Příklady zvláknitelných polymerů [28].....	32
Tab. 3	Porovnání nanovláken s konvenčními vlákny [39].....	33
Tab. 4	Požadavky kladené na scaffold	47
Tab. 5	Parametry LARITHANE LS 1086 TM	51
Tab. 6	Vzdálenost mezi elektrodami při elektrostatickém zvlákňování.	60
Tab. 7	Doba zvlákňování na navržené kolektory a klimatizační podmínky	61
Tab. 8	Průměrné hodnoty nanovláken ve vyrobených vrstvách 1-4 z PVA	77
Tab. 9	Vypočtené hodnoty produktivity zvlákňovacího zařízení u vzorků 1 – 4 .	79

Seznam grafů

Graf. 1	Produktivita navržených kolektorů pro zvlákňování v g/hod	79
---------	---	----

SEZNAM PŘÍLOH

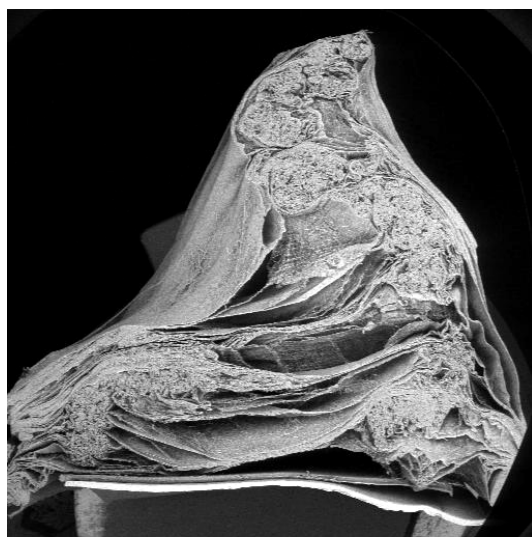
Příloha A – Snímky vyrobených nanovláknenných vrstev

Příloha B – Průměry nanovláken, statistické údaje a histogramy

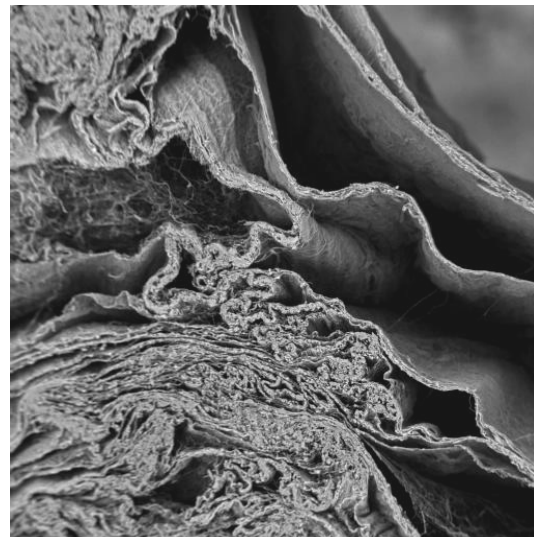
Příloha C - Snímky zaplnění nanovrstev, plocha pórů, statistické údaje

Příloha A

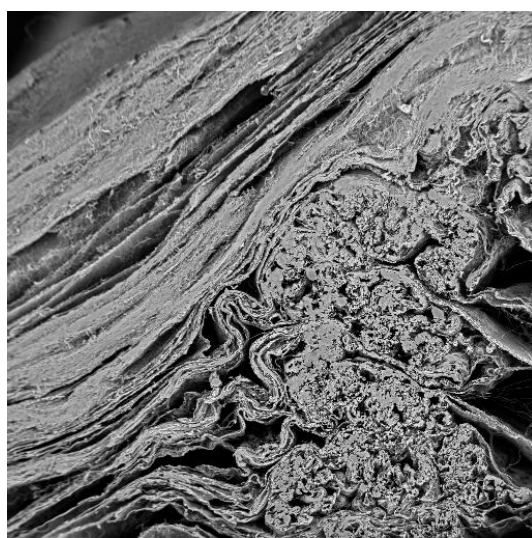
- **Příloha A.1 - kolektor č. 1**



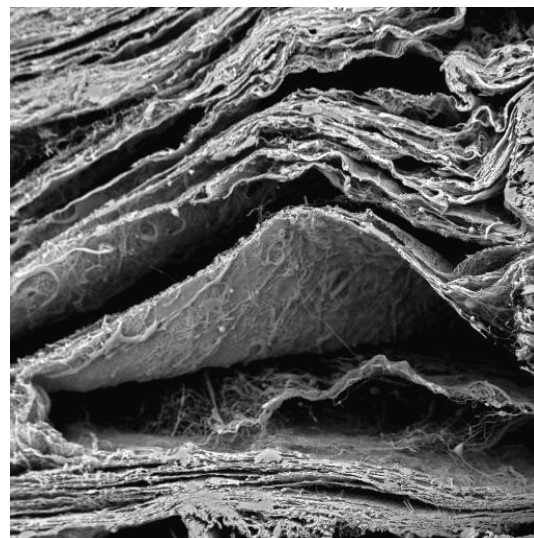
a)



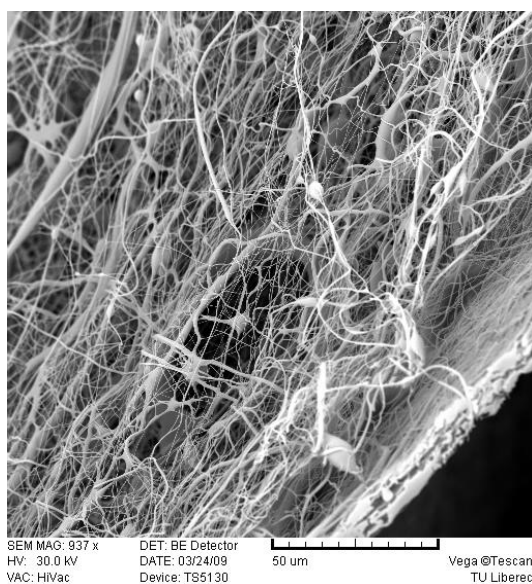
b)



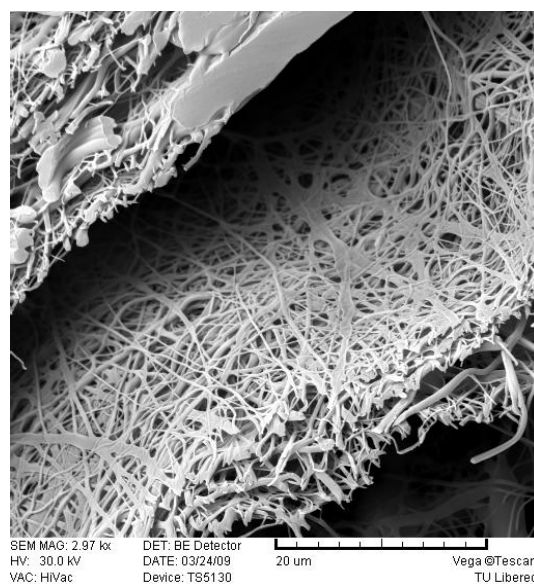
c)



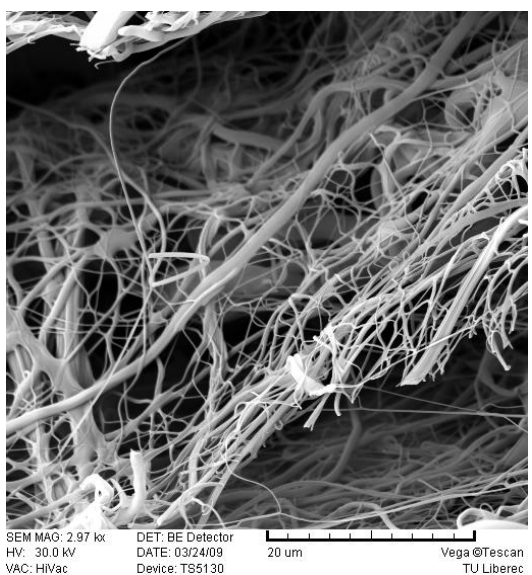
d)



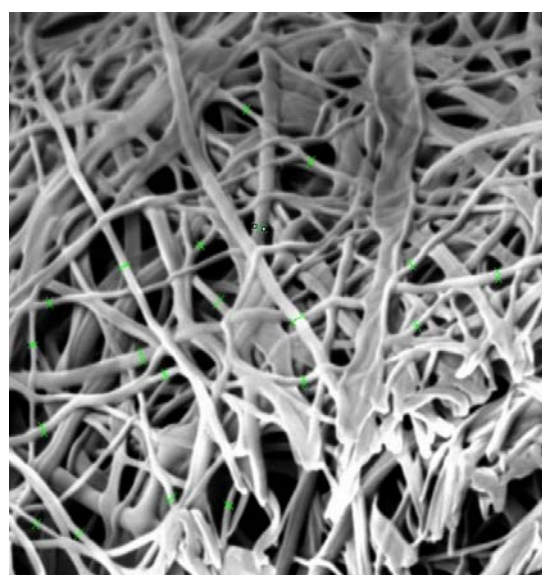
e)



f)



g)

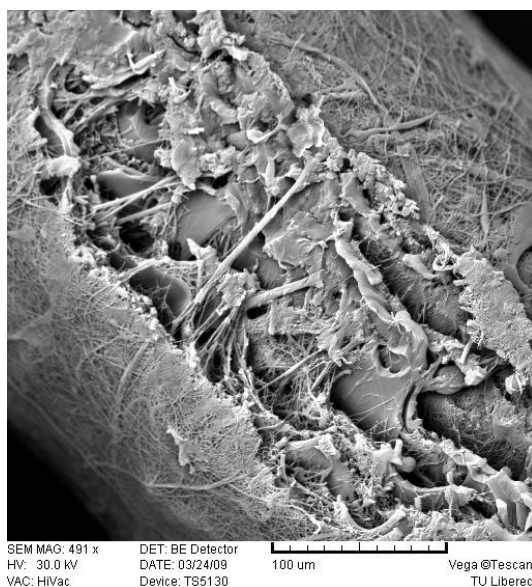


h)

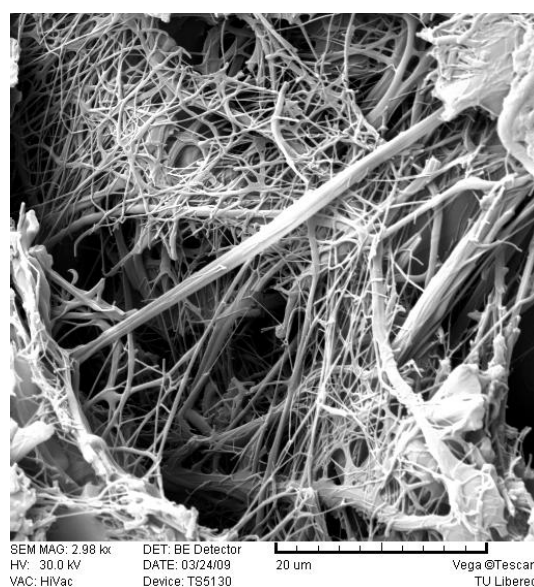
Snímky nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) -- b) 90x

c) 100x d) 200x e) 1000x f) 3000x g) 3000x h) 10000x

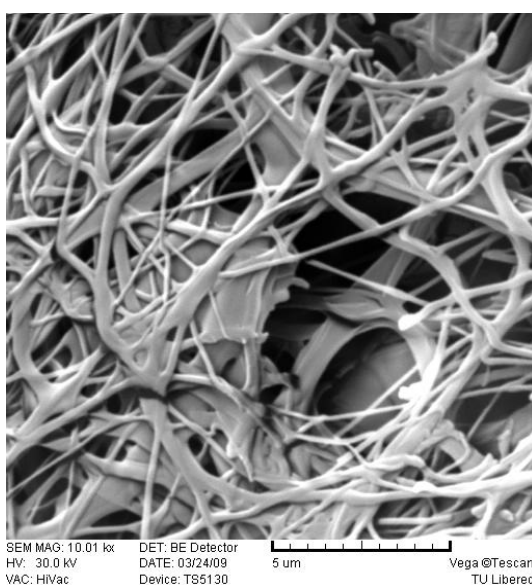
• Příloha A.2 - kolektor č. 2



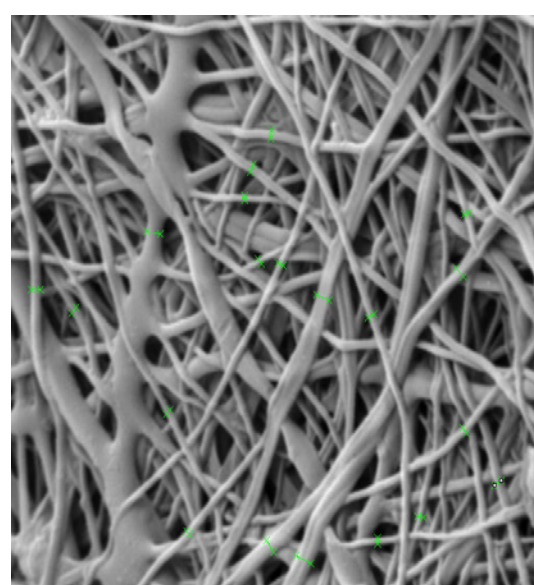
a)



b)



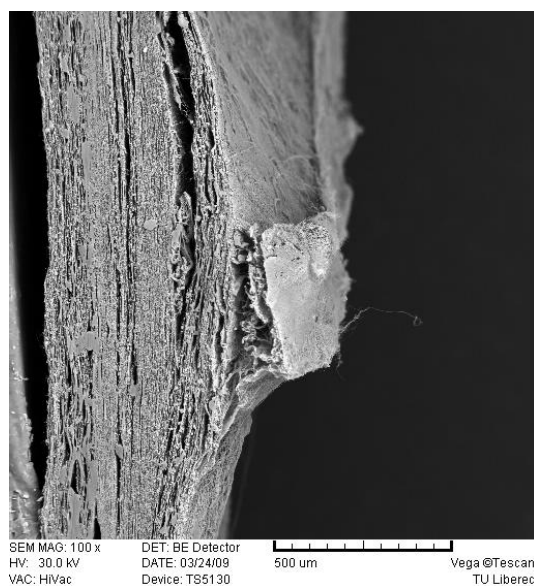
c)



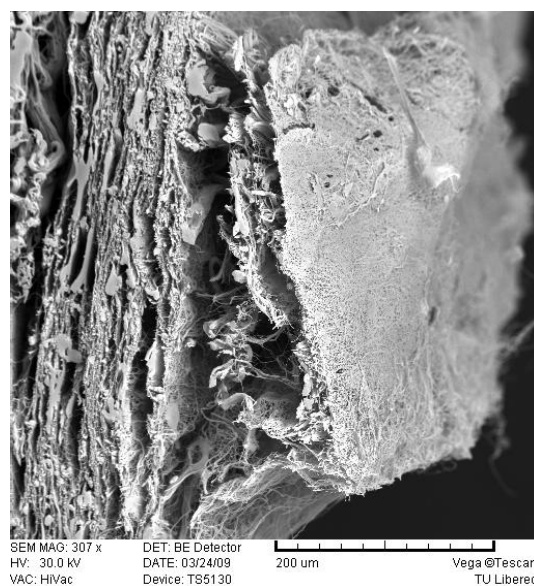
d)

Snímky řezu nanovrstvy „mezi kolečky“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení:

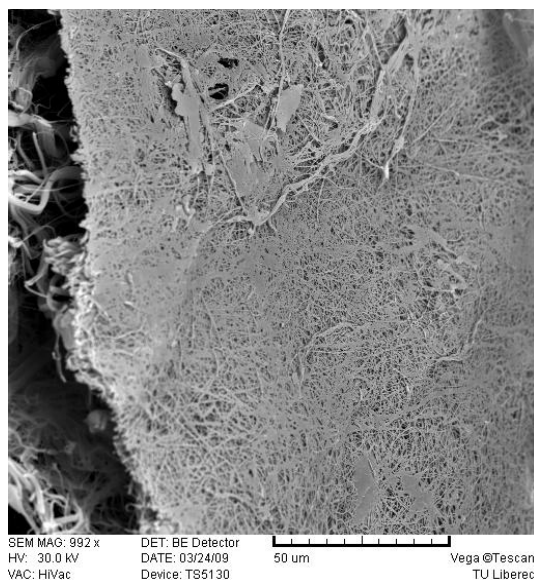
a) 500x b) 3000x c) 10000x d) 10000x



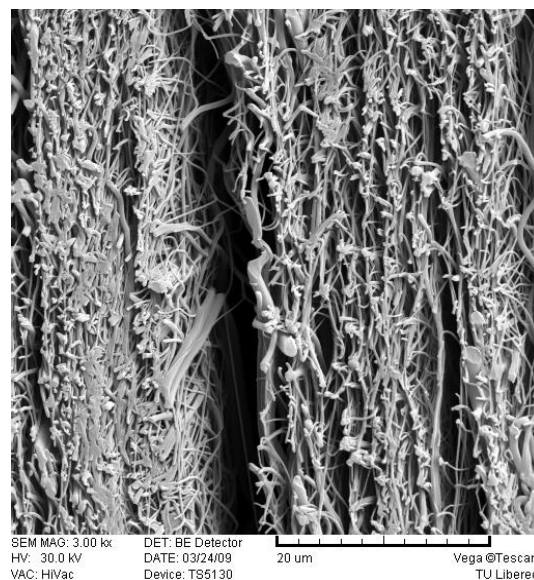
a)



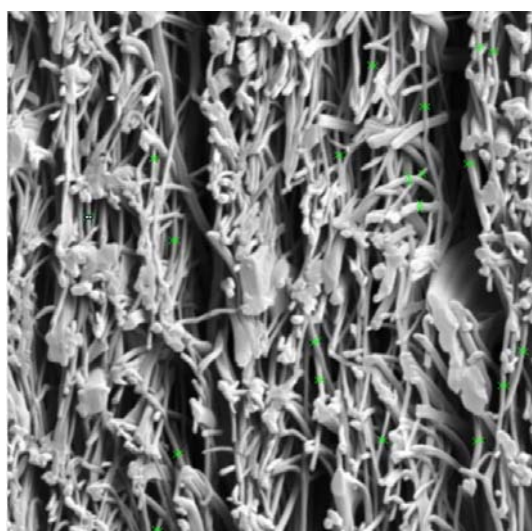
b)



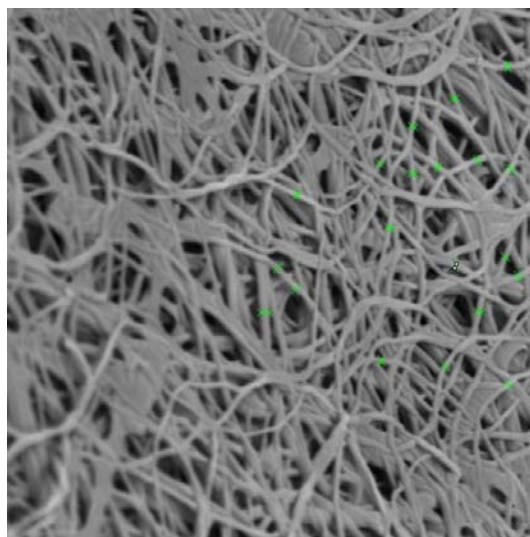
c)



d)



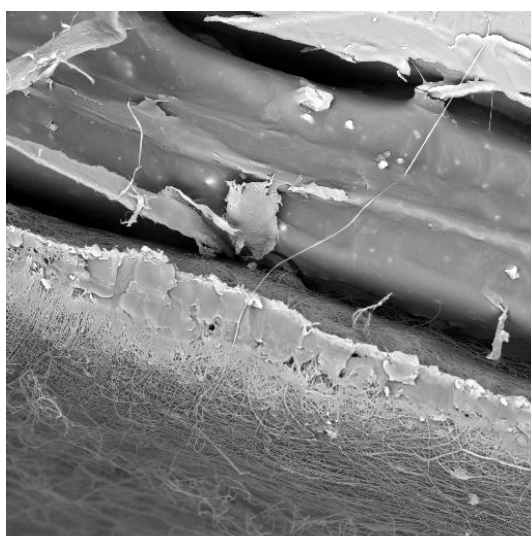
e)



f)

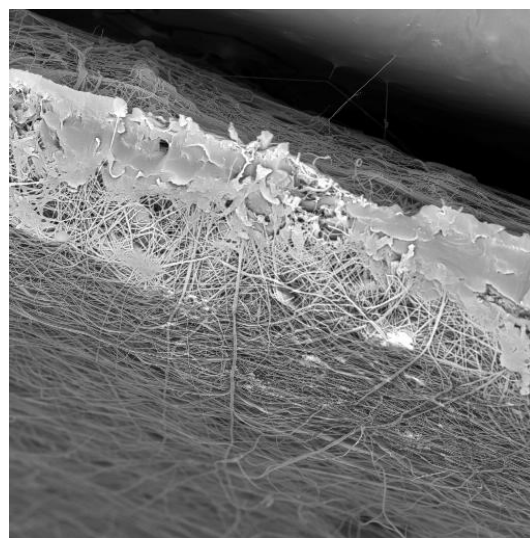
*Snímky řezu nanovrstvy „v kolečku“ z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x b) 300x
c) 1000x d) 3000x e) 7000x f) 8000x*

• **Příloha A.3 - kolektor č. 3**



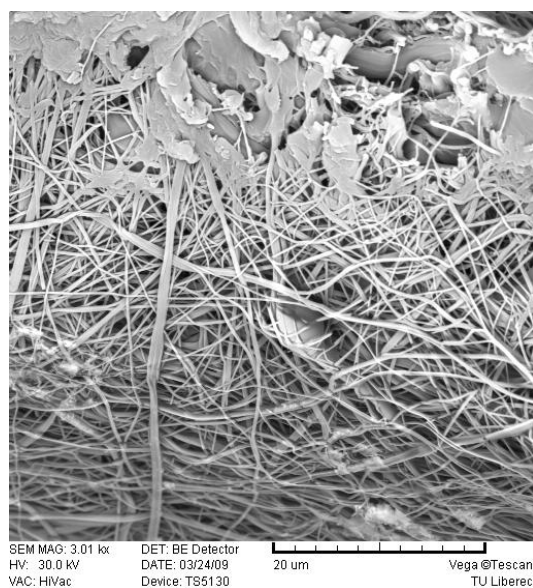
SEM MAG: 494 x
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 03/24/09
Device: TS5130
100 um
Vega ©Tescan
TU Liberec

a)

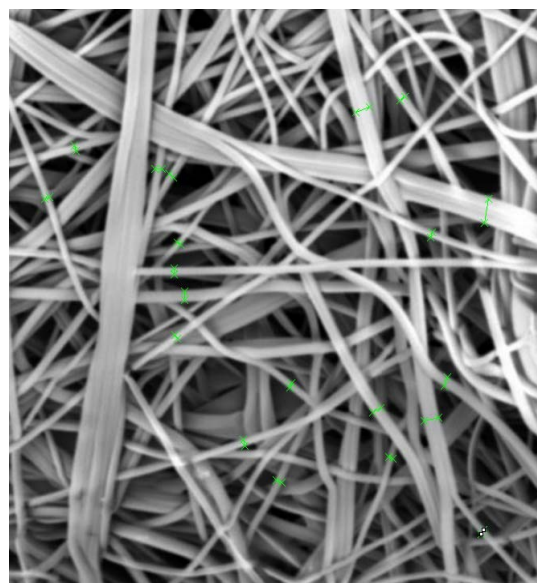


SEM MAG: 1.00 kx
HV: 30.0 kV
VAC: HiVac
DET: BE Detector
DATE: 03/24/09
Device: TS5130
50 um
Vega ©Tescan
TU Liberec

b)

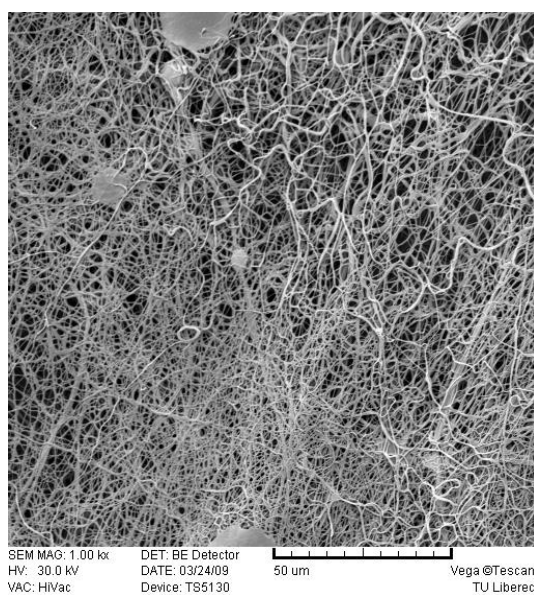


c)

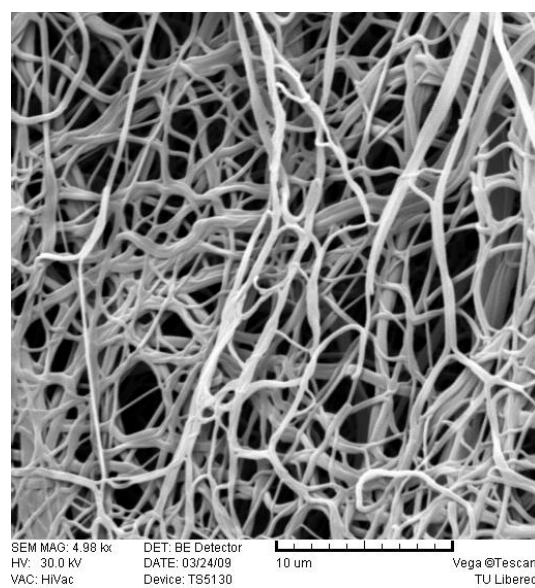


d)

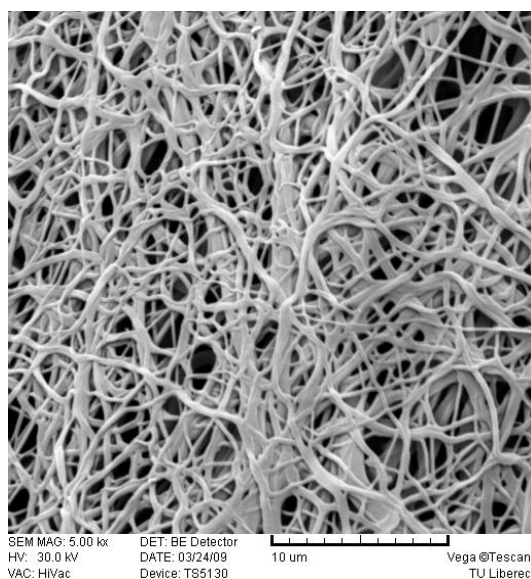
Snimky řezu(povrchu - kvůli nepodařenému řezu) nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 500x, b) 1000x c) 3000x d) 10000x



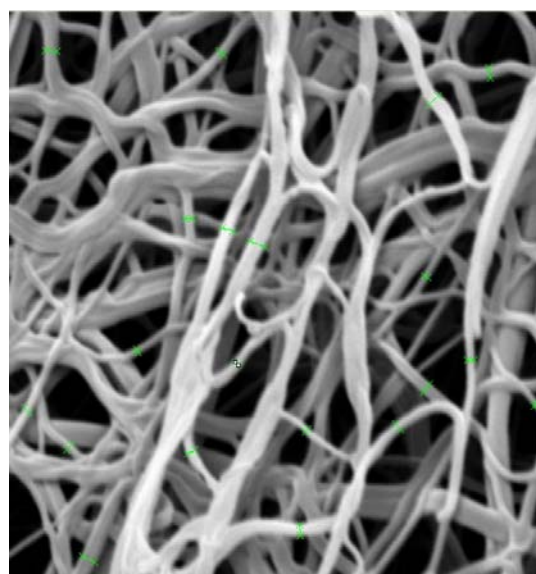
a)



b)



c)



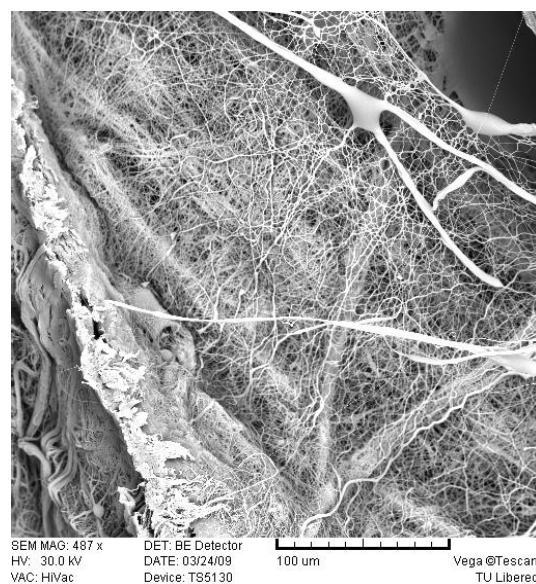
d)

*Snímky povrchu nanovrstvy pozinkovaného pletiva, zvětšení: a) 1000x, b) 5000x
c) 5000x d) 10000x*

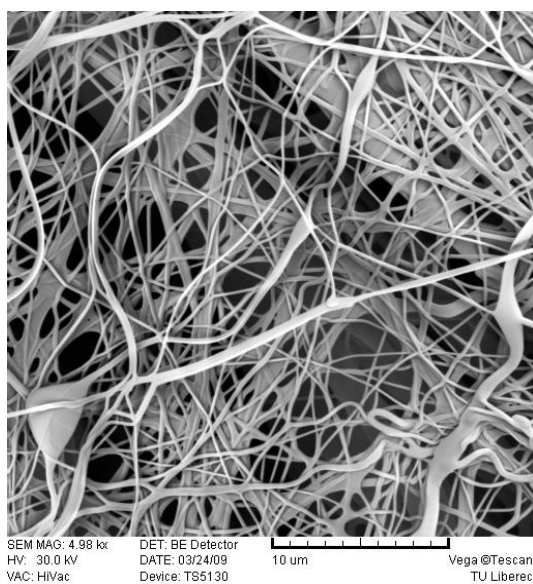
• **Příloha A.4 - kolektor č. 4**



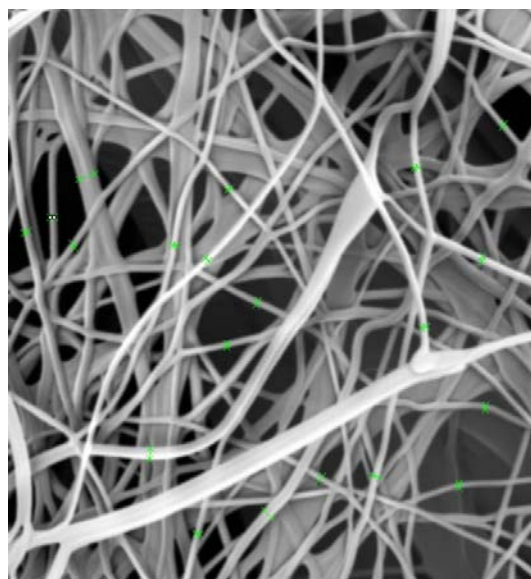
a)



b)



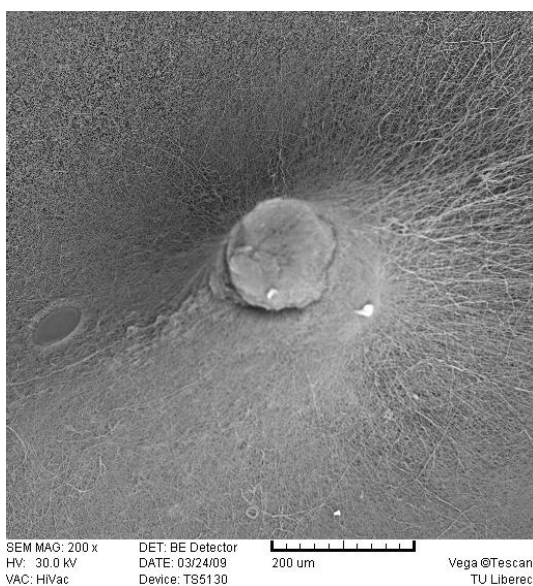
c)



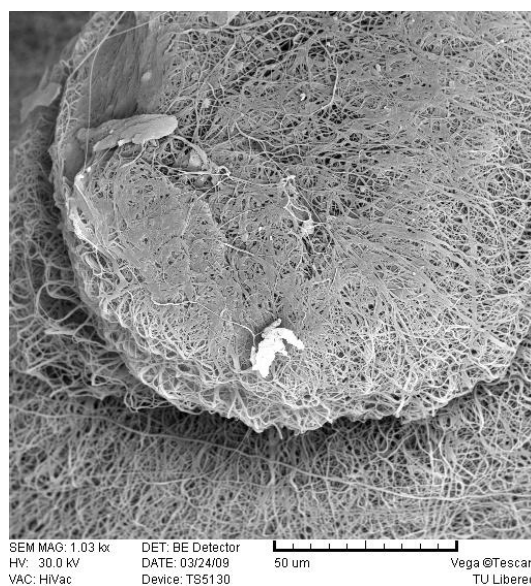
d)

Snímky řezu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 100x, b) 500x

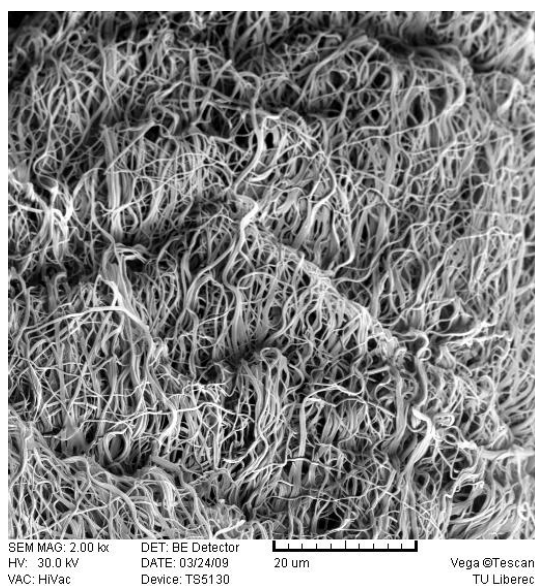
c) 5000x d) 10000x



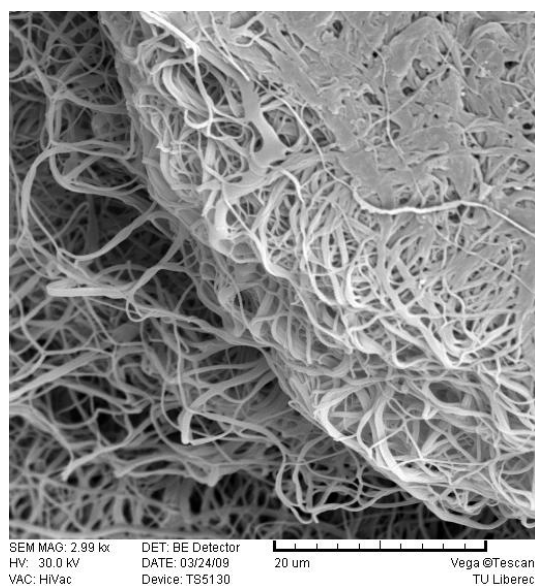
a)



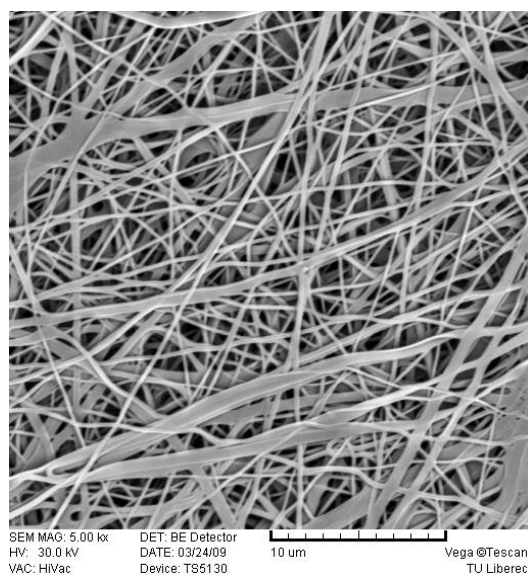
b)



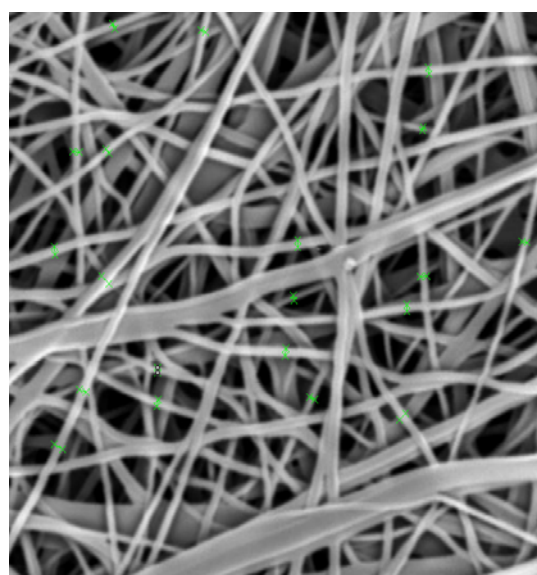
c)



d)



e)



f)

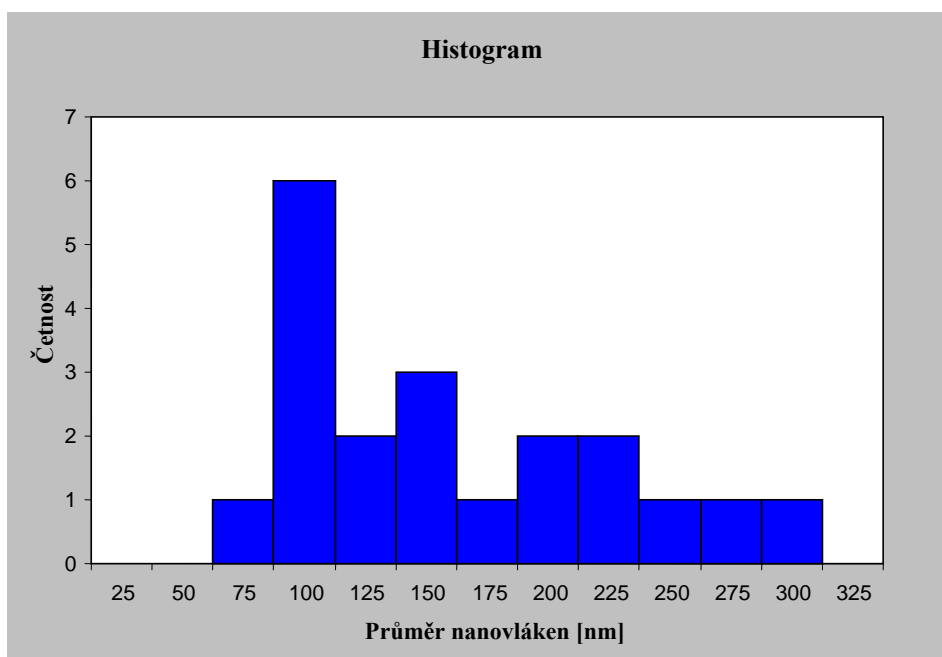
Snímky povrchu nanovrstvy z rastrovacího mikroskopu, zvětšení: a) 200x, b) 1000x c) 2000x d) 3000x, e) 5000x f) 10000x

Příloha B

- **Příloha B.1** - statistické údaje, procesní parametry a histogramy

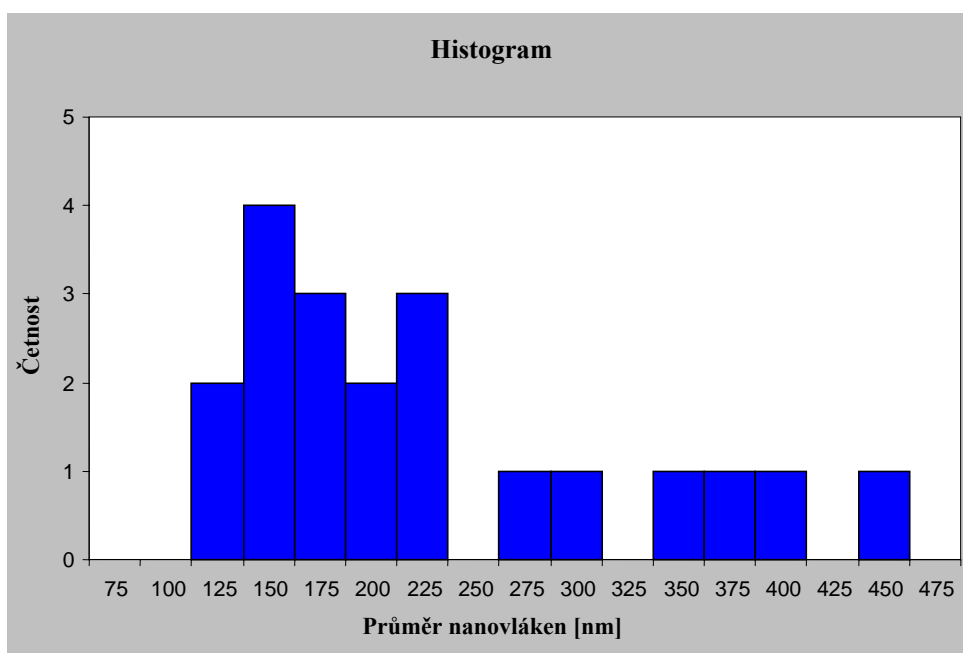
1) Nanovrstva z kolektoru č.1 – řez

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,05	Plošná hmotnost [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]	179,44
El. napětí [kV]	50	Zaplnění [%]	79
Vzdálenost elektrod [mm]	90	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [$\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,3	Střední hodnota [nm]	146,1
Teplota [°C]	18,6	Směrodatná odchylka [nm]	63,16
Relativní vlhkost [%]	35	Variační koeficient [%]	43
Doba zvlákňování [min]	35 a 75	maximum [nm]	293,7
		minimum [nm]	70,8



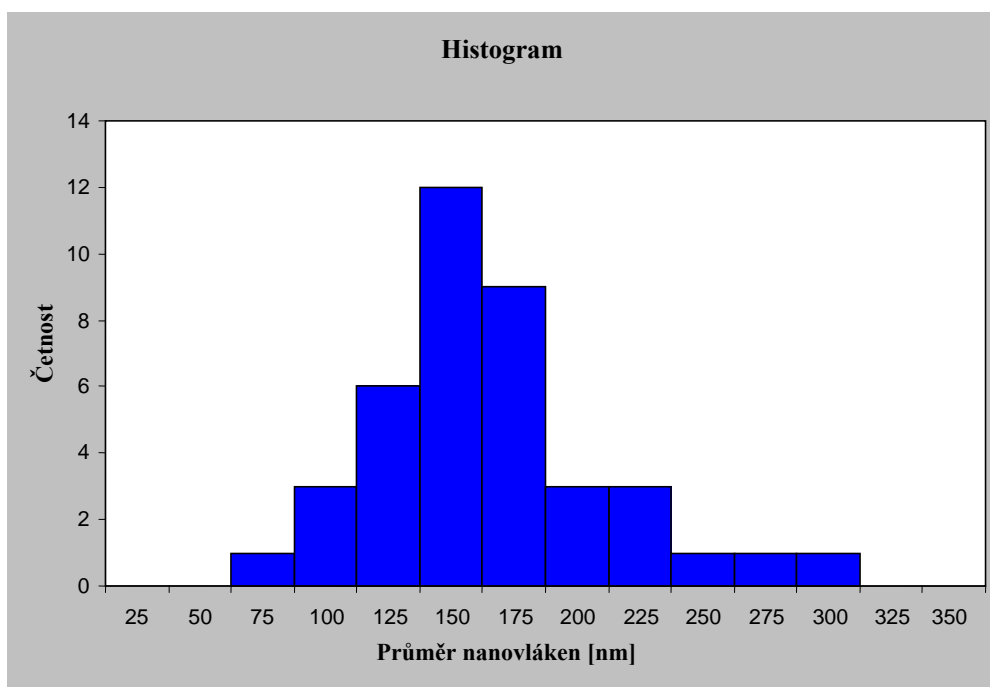
2) Nanovrstva z kolektoru č.2 – řez nanovrstvy „mezi kolečky“

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,04	Plošná hmotnost [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]	180,94
El. napětí [kV]	44,5	Zaplnění [%]	77
Vzdálenost elektrod [mm]	90	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [$\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,3	Střední hodnota [nm]	218,48
Teplota [°C]	18,3	Směrodatná odchylka [nm]	94,33
Relativní vlhkost [%]	38	Variační koeficient [%]	43
Doba zvlákňování [min]	35	maximum [nm]	446,5
		minimum [nm]	114,86



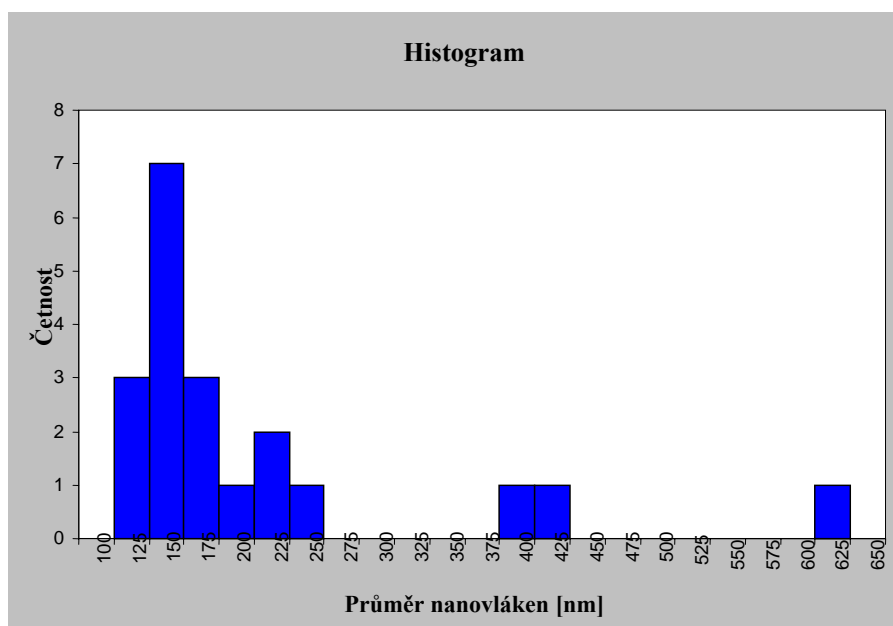
Nanovrstva z kolektoru č.2 – řez nanovrstvy „v kolečku“

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,04	Plošná hmotnost [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]	180,94
El. napětí [kV]	44,5	Zaplnění [%]	72
Vzdálenost elektrod [mm]	90	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [$\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,3	Střední hodnota [nm]	150,95
Teplota [°C]	18,3	Směrodatná odchylka [nm]	42,25
Relativní vlhkost [%]	38	Variační koeficient [%]	28
Doba zvlákňování [min]	35	maximum [nm]	280,09
		minimum [nm]	71,46



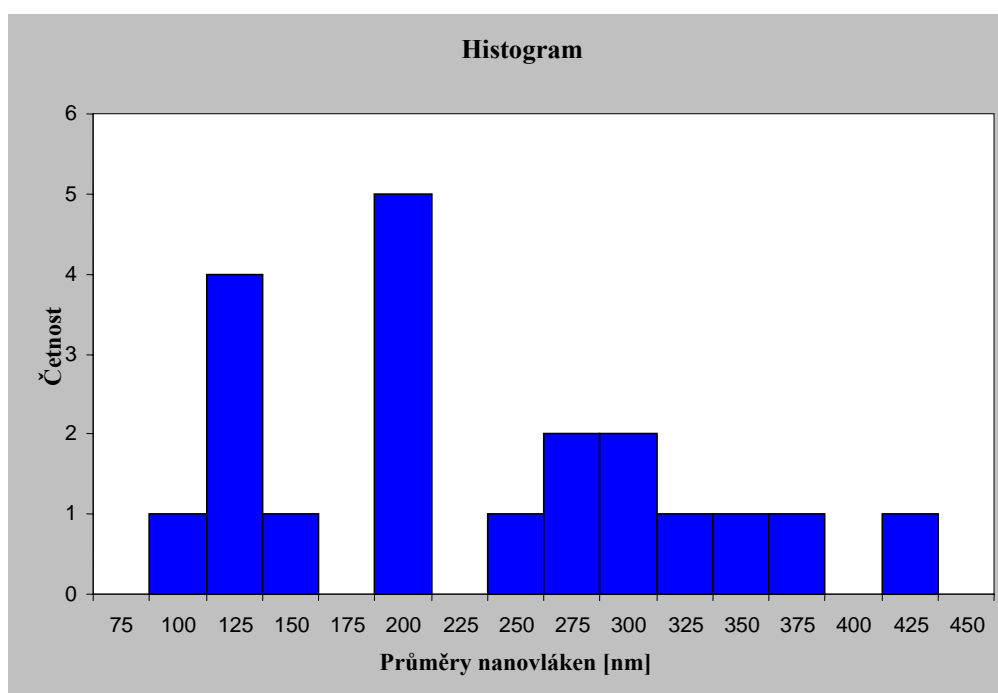
2) Nanovrstva z kolektoru č.3- řez

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,03	Plošná hmotnost [g . m ⁻²]	55,06
El. napětí [kV]	40	Zaplnění [%]	75
Vzdálenost elektrod [mm]	90	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [ot.*min ⁻¹]	0,3	Střední hodnota [nm]	203,45
Teplota [°C]	19	Směrodatná odchylka [nm]	126,46
Relativní vlhkost [%]	39	Variační koeficient [%]	62
Doba zvlákňování [min]	35	maximum [nm]	622,63
		minimum [nm]	102,08



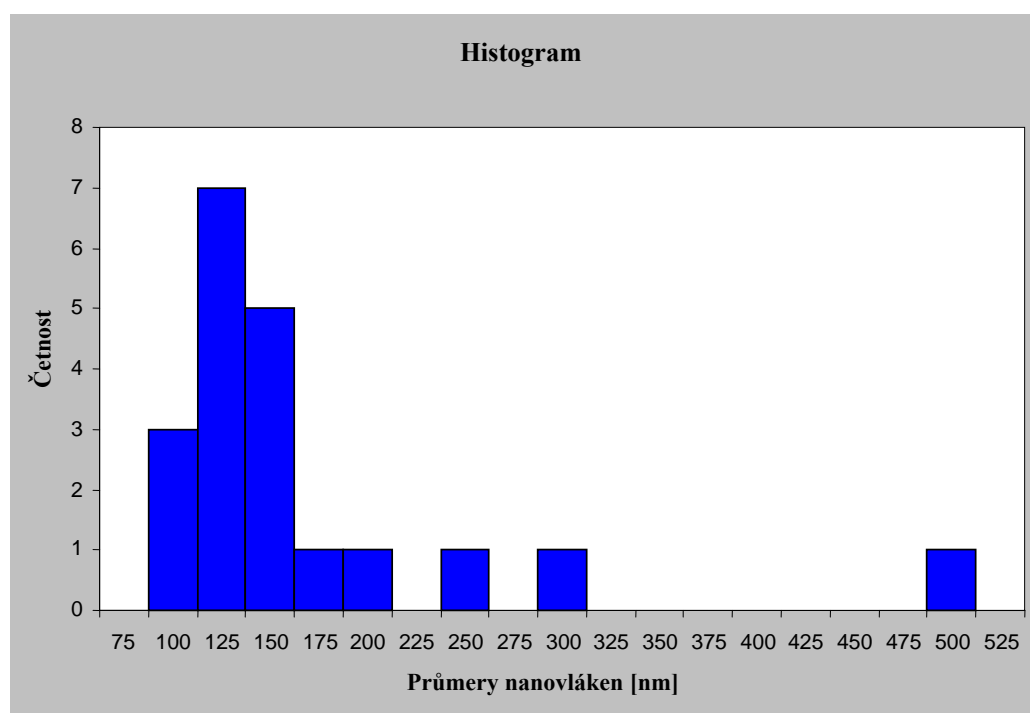
Nanovrstva z kolektoru č.3- povrch

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,03	Plošná hmotnost [g . m ⁻²]	55,06
El. napětí [kV]	40	Zaplnění [%]	72
Vzdálenost elektrod [mm]	90	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [ot.*min ⁻¹]	0,3	Střední hodnota [nm]	219,94
Teplota [°C]	19	Směrodatná odchylka [nm]	93,9
Relativní vlhkost [%]	39	Variační koeficient [%]	43
Doba zvlákňování [min]	35	maximum [nm]	421,93
		minimum [nm]	99,72



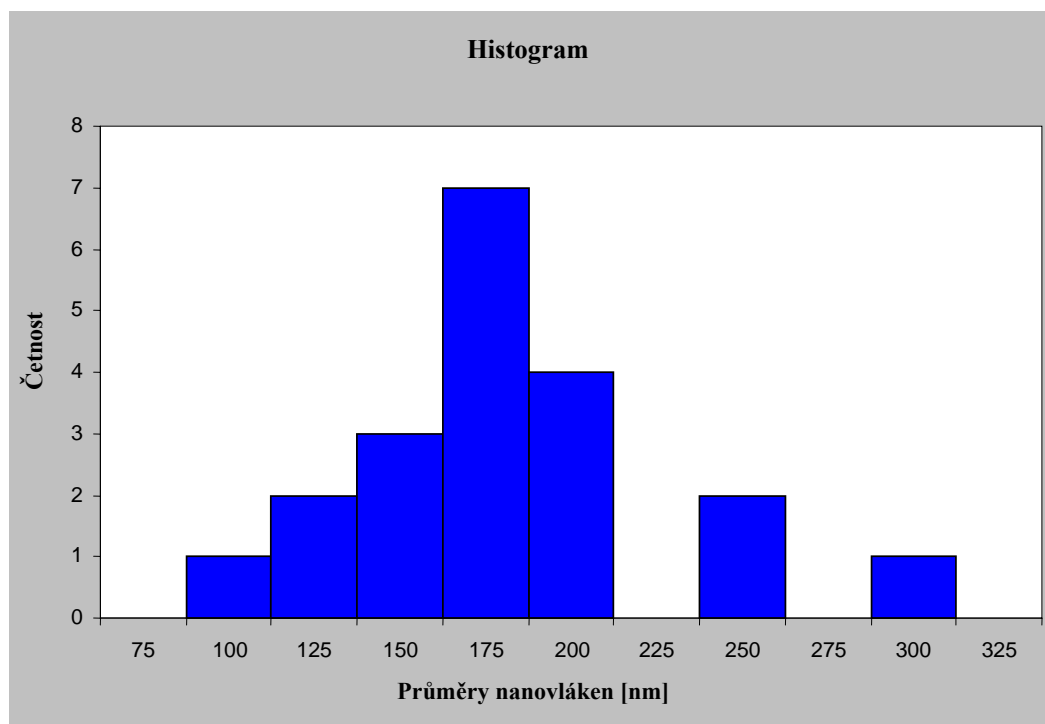
3) Nanovrstva z kolektoru č.4 – řez

Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,04	Plošná hmotnost [g . m ⁻²]	61,89
El. napětí [kV]	45	Zaplnění [%]	75
Vzdálenost elektrod [mm]	100	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [ot.*min ⁻¹]	0,3	Střední hodnota [nm]	155,83
Teplota [°C]	17	Směrodatná odchylka [nm]	88,48
Relativní vlhkost [%]	41	Variační koeficient [%]	57
Doba zvlákňování [min]	25	maximum [nm]	481,71
		minimum [nm]	92,69



Nanovrstva z kolektoru č.4 – povrch

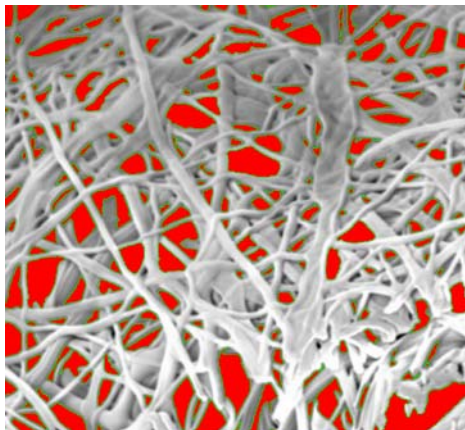
Roztok 12% PVA			
Parametry zařízení „nanospider“		Nanovláknenná vrstva	
El. proud [mA]	0,04	Plošná hmotnost [g . m ⁻²]	61,89
El. napětí [kV]	45	Zaplnění [%]	75
Vzdálenost elektrod [mm]	100	Průměr nanovláken	
Rychlost otáčení válce [ot.*min ⁻¹]	0,3	Střední hodnota [nm]	169,46
Teplota [°C]	17	Směrodatná odchylka [nm]	46,2
Relativní vlhkost [%]	41	Variační koeficient [%]	27
Doba zvlákňování [min]	25	maximum [nm]	289,47
		minimum [nm]	83,16



Příloha C

• Příloha C.1

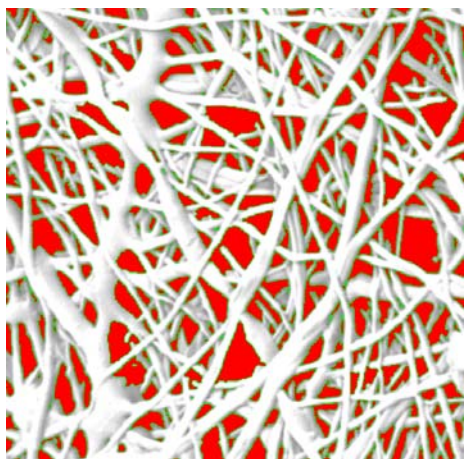
1) Nanovrstva z kolektoru č.1 - řez vrstvy, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	44224718,8
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	79

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	209595,8	290013,3	12824,46	2691426
Obvod póru [nm]	1855,89	1254,08	434,02	9410,27
Šířka póru [nm]	242,05	140,09	68,72	972,55

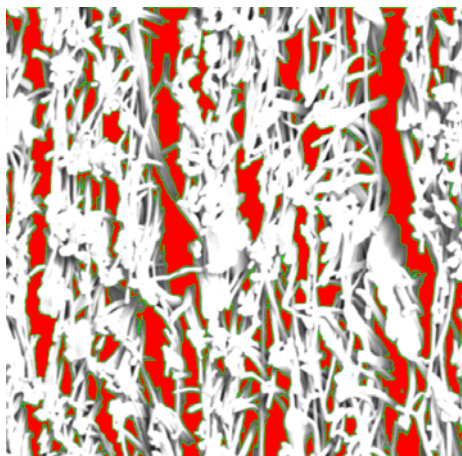
2) Nanovrstva z kolektoru č.2 – řez nanovrstvy „mezi kolečky“, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	60668564
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	72

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	158403,6	254186,6	858,31	2470207
Obvod póru [nm]	1538,95	1447,32	78,56	16390,07
Šířka póru [nm]	183,55	135,83	27,17	923,1

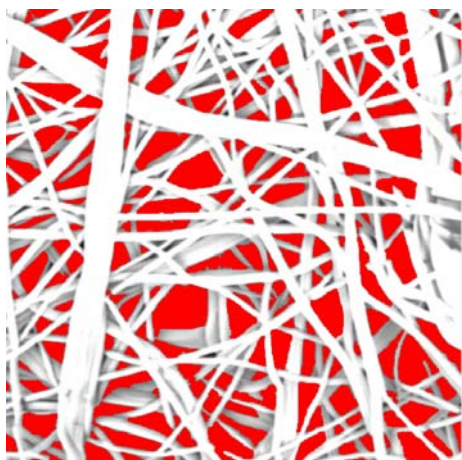
Nanovrstva z kolektoru č.2 – řez nanovrstvy „v kolečku“, zvětšení 7000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	105258893
Celková plocha vzorku [nm ²]	453164132
Zaplnění [%]	77

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	730964,5	1482517	51971,15	14969422
Obvod póru [nm]	4234,03	4717,27	864,15	43707,24
Šířka póru [nm]	300,07	158,08	98,93	860,57

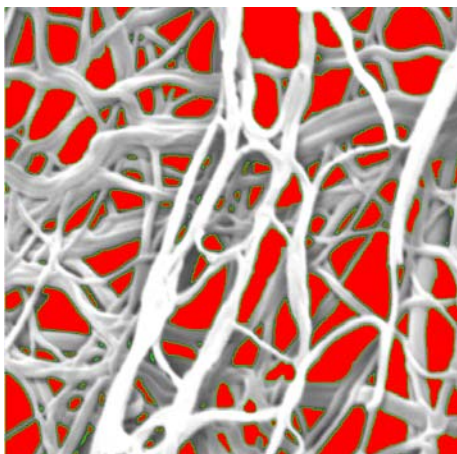
3) Nanovrstva z kolektoru č.3- řez, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	53898021
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	75

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	274989,9	299692,7	16837,61	2200675
Obvod póru [nm]	2173,97	1292,79	485,71	8439,32
Šířka póru [nm]	287,69	168,15	61,13	1277,62

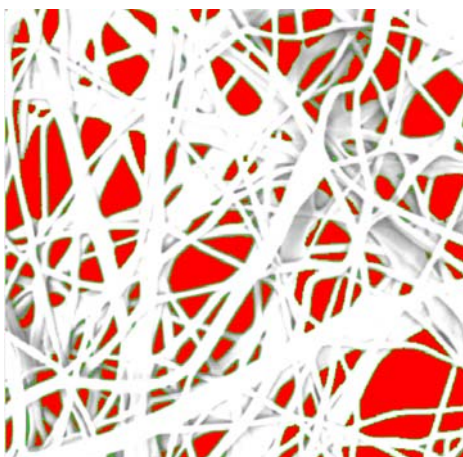
Nanovrstva z kolektoru č.3- povrch, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	60787128
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	72

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	413517,9	587375,2	3367,52	3356576,9
Obvod póru [nm]	2190,75	1674,29	187,84	7579,09
Šířka póru [nm]	350,76	280,31	44,84	1287,49

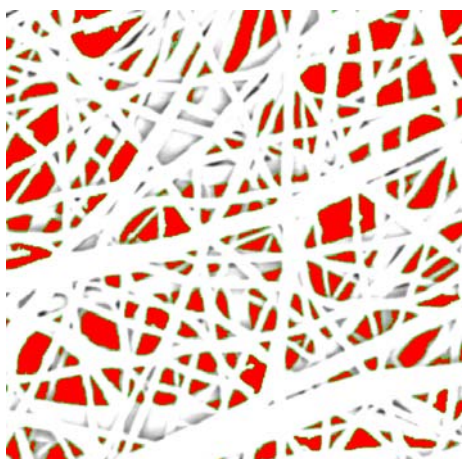
4) Nanovrstva z kolektoru č.4 – řez, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	54508384
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	75

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	214599,94	422255	841,88	4397141
Obvod póru [nm]	1516,45	1293,3	77,8	8390,98
Šířka póru [nm]	235,07	224,81	26,9	2039,5

Nanovrstva z kolektoru č.4 – povrch nanovrstvy, zvětšení 10000x



Celková plocha všech pórů [nm ²]	54564000
Celková plocha vzorku [nm ²]	216964290
Zaplnění [%]	75

Příznak	Průměr	St. odchylka	Minimum	Maximum
Plocha póru [nm ²]	240370000	280,82	24000	1535000
Obvod póru [nm]	60720	35,72	17850	246600
Šířka póru [nm]	8840	4,81	2310	29840